



Gil Gomes Duarte

**Parametrização do Processo de Secagem de Fruta,
Pera e Maçã**



Gil Gomes Duarte

**Parametrização do Processo de Secagem de Fruta,
Pera e Maçã**

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Biotecnologia Alimentar, realizada sob a orientação científica da Doutora Ivonne Delgadillo, Professora associada com agregação do Departamento de Química da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Professor Doutor João Manuel da Costa e Araújo Pereira Coutinho
professor associado com agregação do Departamento de Química da Universidade de Aveiro

Professora Doutora Ivonne Delgadillo Giraldo
professora associada com agregação do Departamento de Química da Universidade de Aveiro

Professora Doutora Dulcineia Maria de Sousa Ferreira Wessel
professora adjunta do Departamento de Indústrias Alimentares da Escola Agrária de Viseu

agradecimentos

À minha orientadora, Professora Doutora Ivonne Delgadillo, pelo seu apoio e dedicação, e também pela criatividade e partilha de conhecimentos aplicados no desenvolvimento deste trabalho.

Aos Professores, Doutor Fernando José Neto da Silva, Doutor José António Lopes da Silva e Doutor Jorge Saraiva por toda a ajuda e ensinamentos nas suas respetivas áreas, nomeadamente secagem, textura e alta pressão.

Aos meus colegas de laboratório pelo debate e companheirismo demonstrado no presente trabalho, em especial ao Feliciano Pinho, Mickael Santos, Ângelo Salvador, Sílvia Sousa, Liliana Fidalgo, Carlota Carvalho e Ângela Cunha.

Aos meus colegas, amigos e professores que privei durante o meu percurso académico no Instituto Superior de Engenharia de Coimbra e na Universidade de Aveiro. E claro, aos amigos de sempre João Caetano e Pedro Gomes.

À minha família pelos valores, fé e amor que me têm transmitido ao longo da minha vida, em especial aos meus pais e irmão, pois o meu êxito é nosso. Agradeço também aos seguintes: D. Elsa, D. Branca, D. Odete, Ana, Nuno, Francisco e Maria Loureiro.

À Joana por percorrer comigo as subidas e descidas da vida.

“A ciência será sempre uma busca e jamais uma descoberta. É uma viagem, nunca uma chegada.”

Karl Popper

palavras-chave

Secagem, pera, maçã, cinética, atividade da água, textura, escurecimento, polifenoloxidase

resumo

A presente dissertação apresenta a aplicação da secagem convectiva na Pera Rocha e na Maçã Malápio da Serra, recorrendo a um secador em túnel.

O primeiro objetivo foi estudar a cinética de secagem relacionada com as condições de operação, nomeadamente a temperatura (30, 40, 50 e 60°C), a humidade absoluta (10, 15 e 25g/kg) e a velocidade (0,5, 1,5 e 3m/s). A temperatura do ar assumiu um papel preponderante na cinética de secagem. Concluiu-se que uma temperatura de secagem superior resultou numa taxa de secagem mais elevada e, consequentemente num menor tempo de secagem. Determinou-se que a taxa de secagem foi diminuindo ao longo do tempo de processamento, pois a humidade do fruto foi também diminuindo. Observou-se, ainda, que a cinética de secagem da pera foi muito idêntica à da maçã.

Para além disto avaliaram-se algumas modificações físico-químicas e bioquímicas destes frutos em função do processo de secagem. As alterações macroscópicas mais distintivas foram o encolhimento e o escurecimento.

Os atributos de textura analisados permitiram verificar que a utilização de temperaturas de secagem mais elevadas promovem a produção de peras e maçãs mais duras. Enquanto uma humidade absoluta igual ou superior a 15g/kg originam peras secas com maior coesividade e elasticidade. Comparando os dois frutos, as maçãs secas foram mais elásticas e as peras foram mais coesas.

Com a redução do conteúdo de humidade da fruta, a atividade da água (a_w) diminuiu para um nível que previne o desenvolvimento de microrganismos e reações químicas e enzimáticas indesejáveis, à exceção do ensaio realizado à temperatura de 30°C que apresentou uma a_w de 0,675.

Quanto às características sensoriais revelou-se importante a intensidade da cor de algumas peras secas (castanho avermelhado), uma vez que apenas ligeiras diferenças na mastigabilidade e sabor foram identificadas.

Estudou-se igualmente o escurecimento enzimático mediado pela atividade da polifenoloxidase (PPO) e verificou-se a sua diminuição com o processo de secagem. Determinou-se que a utilização de uma temperatura de secagem de 30°C promove eficazmente o escurecimento, como comprovado pela cor obtida e pela atividade da PPO mais elevada.

A aplicação da alta pressão demonstrou ter potencial como pré-tratamento de secagem da pera. Embora não fosse detetada a ativação da PPO, os vários tratamentos aceleraram o escurecimento das peras.

key-words

Drying, pear, apple, kinetics, water activity, browning, polyphenol oxidase

abstract

The present essay describes the application of convective drying in “Pera Rocha” and “Maçã Malápio da Serra”, using a tunnel dryer.

The first objective was to study the drying kinetics related with operation conditions, namely temperature (30, 40, 50 and 60°C), absolute humidity (10, 15 and 25g/kg) and air velocity (0,5, 1,5 and 3m/s). The air temperature played a leading role in the drying kinetics. It was concluded that a higher temperatures resulted in higher drying rates and, consequently shorter drying times. It was determined that the drying rate decreased along the processing time, because the moisture of the fruit was also decreased. It was also observed that the drying kinetics of the pear was very similar to that of the apple.

Furthermore, the physico-chemical and biochemical changes of these fruits depending on the drying process were evaluated. The most distinctive macroscopic changes were shrinkage and browning.

The texture attributes analysis allowed to verify that the use of higher drying temperature promotes the production of hardened pears and apples, while an absolute humidity of no less than 15g/kg originates dried pears with higher cohesiveness and springiness. When comparing the two fruits, dried apples were more elastic and pears were more cohesive.

With the reduction of moisture from the fruits, the water activity (a_w) decreased to a level that prevents microbial grow and undesirable chemical and enzymatic reactions, except for the test performed at 30°C which showed a a_w of 0,675.

As for the sensory characteristics, the colour intensity of some dried pears (reddish brown) proved to be important, since only slight differences in chewiness and taste were identified.

The enzymatic browning mediated by polyphenol oxidase (PPO) was studied as well, and PPO activity was found to decrease with the drying process. It was determined that using a drying temperature of 30°C promotes effective browning, as evidenced by the obtained colour and the higher PPO activity.

The application of high pressure demonstrated potential as a pretreatment for pear drying. Although PPO activation was not observed, the pressure treatments accelerated the browning of the pears.

Índice

I. Enquadramento do tema e objetivos	1
I.1. Maçã e Pera	3
I.1.1. Origem, morfologia e constituintes	3
I.1.2. Variedades em estudo – Maçã Malápio da Serra e Pera Rocha	5
I.2. Secagem	6
I.2.1. História, definição e objetivos da secagem	6
I.2.2. Processo de secagem	7
I.2.3. Secagem de frutas	9
I.2.4. Método de secagem	11
I.3. Propriedades e modificações físico-químicas e bioquímicas da fruta durante a secagem	12
I.3.1. Atividade da água	12
I.3.2. Textura	16
I.3.3. Escurecimento enzimático	18
II. Material e métodos	23
II.1. Secagem	23
II.1.1. Preparação das amostras de pera e de maçã	23
II.1.2. Determinação da humidade	23
II.1.3. Instalação e controlo do processo	24
II.1.4. Tratamento dos dados obtidos	25
II.1.5. Metodologia aplicada para os ensaios de secagem	26
II.2. Determinação da atividade da água (a_w)	28
II.3. Análise da textura	28
II.4. Análise sensorial	29
II.5. Escurecimento enzimático pela polifenoloxidase (PPO)	29
III. Resultados e discussão	31
III.1. Estudo do processo de secagem	31
III.1.1. Cinética da secagem	31
III.1.2. Análise da textura	35
III.1.3. Determinação da atividade da água (a_w)	40
III.1.4. Análise sensorial	42

III.2. Efeito da temperatura de secagem no processo e no produto	47
III.2.1. Efeito da temperatura na cinética da secagem	47
III.2.2. Determinação da atividade da água (a_w)	51
III.2.3. Análise da textura	53
III.2.4. Estudo do escurecimento enzimático pela polifenoloxidase (PPO) durante a secagem	55
III.2.5. Efeito da alta pressão no escurecimento da pera	59
IV. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	61
V. Referências	63
VI. Anexos	68

Índice de Tabelas

Tabela 1: Registo dos valores extraídos de tempo, massa, temperatura da amostra, humidade absoluta e relativa, temperatura do secador e velocidade.	25
Tabela 2: Registo dos fatores de controlo e níveis para implementação do método de Taguchi.	26
Tabela 3: Registo dos ensaios e das respetivas condições de secagem utilizadas pelo método Taguchi.	27
Tabela 4: Registo dos valores obtidos de dureza, coesividade, elasticidade e mastigabilidade para os 9 ensaios de secagem.	35
Tabela 5: Registo dos valores da atividade da água para os nove ensaios realizados.	40
Tabela 6: Registo dos valores de atividade da água para as diferentes temperaturas de secagem efetuadas.	52
Tabela 7: Registo dos valores da dureza, da coesividade, da elasticidade e da mastigabilidade obtidos para a Pera Rocha e para a Maçã Malápico da Serra, sujeitas a diferentes temperaturas de secagem.	53
Tabela 8: Registo do controlo dos parâmetros de secagem para os nove ensaios realizados.	68
Tabela 9: Registo dos valores de massa inicial e final e de humidade inicial e final da Pera Rocha para os nove realizados.	68
Tabela 10: Registo do controlo dos parâmetros de secagem para os quatro ensaios realizados, com temperaturas de secagem diferentes.	92
Tabela 11: Registo dos valores de massa inicial e final e de humidade inicial e final da Pera Rocha para os quatro realizados, com temperaturas de secagem diferentes.	92
Tabela 12: Registo dos valores de atividade da PPO na Maçã Malápico da Serra e Pera Rocha frescas e durante a secagem da pera para diferentes temperaturas de operação.	103
Tabela 13: Registo dos valores da atividade da PPO da pera para os processamentos de 50MPa, 100MPa, 200MPa e 400MPa, durante 5 minutos.	103

Índice de Figuras

Figura 1: Maçã Malápico da Serra.	5
Figura 2: Pera Rocha.	6
Figura 3: Curva de velocidade de secagem em função da humidade livre (Singh e Heldman, 2001).	8
Figura 4: Estabilidade dos alimentos em função da atividade de água (Rahman, 2007).	15
Figura 5: Mecanismo da polifenoloxidase (Whitaker <i>et al.</i> , 2003).	20
Figura 6: Instalação de secagem presente no laboratório de Termofluidos do Departamento de Engenharia Mecânica.	24
Figura 7: Esquema de funcionamento do secador (Boeri <i>et al.</i> , 2011).	24

Figura 8: Representação gráfica dos parâmetros de compressão através da curva de TPA. _____	29
Figura 9: Representação gráfica da humidade (adimensional) da Pera Rocha em função do tempo de secagem para os nove ensaios. _____	32
Figura 10: Representação gráfica da influência das condições do ar de secagem no tempo de operação. ____	34
Figura 11: Dureza das peras secas para os nove ensaios realizados. Colunas com a mesma letra não são estatisticamente diferentes ($p < 0,05$). _____	36
Figura 12: Coesividade das peras secas para os nove ensaios realizados. Colunas com a mesma letra não são estatisticamente diferentes ($p < 0,05$). _____	36
Figura 13: Elasticidade das peras secas para os nove ensaios realizados. Colunas com a mesma letra não são estatisticamente diferentes ($p < 0,05$). _____	37
Figura 14: Mastigabilidade das peras secas para os nove ensaios realizados. Colunas com a mesma letra não são estatisticamente diferentes ($p < 0,05$). _____	37
Figura 15: Representação gráfica da influência das condições do ar de secagem na dureza das peras secas. _____	39
Figura 16: Pera Rocha seca pelas condições do ensaio 1. _____	42
Figura 17: Pera Rocha seca pelas condições do ensaio 2. _____	42
Figura 18: Pera Rocha seca pelas condições do ensaio 3. _____	42
Figura 19: Pera Rocha seca pelas condições do ensaio 4. _____	42
Figura 20: Pera Rocha seca pelas condições do ensaio 5. _____	42
Figura 21: Pera Rocha seca pelas condições do ensaio 6. _____	42
Figura 22: Pera Rocha seca pelas condições do ensaio 7. _____	42
Figura 23: Pera Rocha seca pelas condições do ensaio 8. _____	42
Figura 24: Pera Rocha seca pelas condições do ensaio 9. _____	42
Figura 25: Resultado da análise sensorial relativa à intensidade da cor dos nove ensaios. _____	44
Figura 26: Resultado da análise sensorial relativa à intensidade da mastigabilidade dos nove ensaios. ____	44
Figura 27: Resultado da análise sensorial relativa à intensidade do sabor dos nove ensaios. _____	45
Figura 28: Representação gráfica da humidade (adimensional) da pera em função do tempo de secagem para os quatro ensaios realizados, com temperaturas de secagem diferentes. _____	47
Figura 29: Representação gráfica da taxa de secagem em função do tempo de secagem para os quatro ensaios realizados, com temperaturas de secagem diferentes. _____	48
Figura 30: Representação gráfica da taxa de secagem em função da humidade para os quatro ensaios realizados, com temperaturas de secagem diferentes. _____	49
Figura 31: Representação gráfica da taxa de secagem em função da humidade dos dois frutos, para o ensaio de secagem com as seguintes condições: 50°C, 15 gH ₂ O/kg de ar seco e 3 m/s. _____	51
Figura 32: Dureza da Pera Rocha seca a diferentes temperaturas. Colunas com a mesma letra não são estatisticamente diferentes ($p < 0,05$). _____	54
Figura 33: Coesividade da Pera Rocha seca a diferentes temperaturas. Colunas com a mesma letra não são estatisticamente diferentes ($p < 0,05$). _____	54
Figura 34: Elasticidade da Pera Rocha seca a diferentes temperaturas. Colunas com a mesma letra não são estatisticamente diferentes ($p < 0,05$). _____	54
Figura 35: Mastigabilidade da Pera Rocha seca a diferentes temperaturas. Colunas com a mesma letra não são estatisticamente diferentes ($p < 0,05$). _____	54
Figura 36: Registo dos valores de atividade da polifenoloxidase (PPO) para a Pera Rocha e para a Maçã Malápico da Serra frescas. _____	55
Figura 37: Pera Rocha seca a 30°C. _____	56
Figura 38: Pera Rocha seca a 40°C. _____	56
Figura 39: Pera Rocha seca a 50°C. _____	56
Figura 40: Pera Rocha seca a 60°C. _____	56
Figura 41: Maçã Malápico da Serra seca a 30°C. _____	57
Figura 42: Maçã Malápico da Serra seca a 40°C. _____	57
Figura 43: Maçã Malápico da Serra seca a 50°C. _____	57
Figura 44: Maçã Malápico da Serra seca a 60°C. _____	57
Figura 45: Registo dos valores de atividade da PPO durante a secagem para diferentes temperaturas de operação. Colunas com a mesma letra não são estatisticamente diferentes ($p < 0,05$). _____	58
Figura 46: Pera Rocha não tratada. _____	59
Figura 47: Pera Rocha pressurizada a 50MPa. _____	59
Figura 48: Pera Rocha pressurizada 100MPa. _____	59
Figura 49: Pera Rocha pressurizada 200MPa. _____	59
Figura 50: Pera Rocha pressurizada a 400MPa. _____	59

Figura 51: Registro dos valores da atividade da PPO da pera para os processamentos de 50MPa, 100MPa, 200MPa e 400MPa, durante 5 minutos.	60
Figura 52: Comportamento da massa da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 1.	69
Figura 53: Taxa de secagem em função do tempo de operação para o ensaio 1.	69
Figura 54: Variação do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 1.	70
Figura 55: Taxa de secagem em função do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha para o ensaio 1.	70
Figura 56: Comportamento da massa da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 2.	71
Figura 57: Taxa de secagem em função do tempo de operação para o ensaio 2.	71
Figura 58: Variação do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 2.	72
Figura 59: Taxa de secagem em função do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha para o ensaio 2.	72
Figura 60: Comportamento da massa da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 3.	73
Figura 61: Taxa de secagem em função do tempo de operação para o ensaio 3.	73
Figura 62: Variação do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 3.	74
Figura 63: Taxa de secagem em função do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha para o ensaio 3.	74
Figura 64: Comportamento da massa da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 4.	75
Figura 65: Taxa de secagem em função do tempo de operação para o ensaio 4.	75
Figura 66: Variação do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 4.	76
Figura 67: Taxa de secagem em função do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha para o ensaio 4.	76
Figura 68: Comportamento da massa da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 5.	77
Figura 69: Taxa de secagem em função do tempo de operação para o ensaio 5.	77
Figura 70: Variação do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 5.	78
Figura 71: Taxa de secagem em função do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha para o ensaio 5.	78
Figura 72: Comportamento da massa da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 6.	79
Figura 73: Taxa de secagem em função do tempo de operação para o ensaio 6.	79
Figura 74: Variação do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 6.	80
Figura 75: Taxa de secagem em função do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha para o ensaio 6.	80
Figura 76: Comportamento da massa da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 7.	81
Figura 77: Taxa de secagem em função do tempo de operação para o ensaio 7.	81
Figura 78: Variação do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 7.	82
Figura 79: Taxa de secagem em função do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha para o ensaio 7.	82
Figura 80: Comportamento da massa da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 8.	83
Figura 81: Taxa de secagem em função do tempo de operação para o ensaio 8.	83
Figura 82: Variação do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 8.	84
Figura 83: Taxa de secagem em função do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha para o ensaio 8.	84
Figura 84: Comportamento da massa da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 9.	85
Figura 85: Taxa de secagem em função do tempo de operação para o ensaio 9.	85
Figura 86: Variação do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 9.	86
Figura 87: Taxa de secagem em função do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha para o ensaio 9.	86
Figura 88: Representação gráfica da massa (adimensional) da pera em função do tempo de secagem para os nove ensaios.	87
Figura 89: Representação gráfica da taxa de secagem em função do tempo de secagem para os nove ensaios realizados.	87
Figura 90: Comportamento da massa da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio A.	93
Figura 91: Taxa de secagem em função do tempo de operação para o ensaio A.	93
Figura 92: Variação do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio A.	94
Figura 93: Taxa de secagem em função do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha para o ensaio A.	94
Figura 94: Comportamento da massa da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio B.	95
Figura 95: Taxa de secagem em função do tempo de operação para o ensaio B.	95

Figura 96: Variação do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio B.	96
Figura 97: Taxa de secagem em função do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha para o ensaio B.	96
Figura 98: Comportamento da massa da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio C.	97
Figura 99: Taxa de secagem em função do tempo de operação para o ensaio C.	97
Figura 100: Variação do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio C.	98
Figura 101: Taxa de secagem em função do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha para o ensaio C.	98
Figura 102: Comportamento da massa da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio D.	99
Figura 103: Taxa de secagem em função do tempo de operação para o ensaio D.	99
Figura 104: Variação do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio D.	100
Figura 105: Taxa de secagem em função do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha para o ensaio D.	100
Figura 106: Comportamento da massa da Maçã Malápiao da Serra em função do tempo de secagem para o ensaio a 50°C; 15g/kg; 3m/s.	101
Figura 107: Taxa de secagem em função do tempo de operação para o ensaio a 50°C; 15g/kg; 3m/s.	101
Figura 108: Variação do teor de humidade (base húmida) da Maçã Malápiao da Serra em função do tempo de secagem para o ensaio a 50°C; 15g/kg; 3m/s.	102
Figura 109: Taxa de secagem em função do teor de humidade (base húmida) da Maçã Malápiao da Serra para o ensaio a 50°C; 15g/kg; 3m/s.	102

Abreviaturas

ΔAbs	– Variação de absorvância
Δt	– Intervalo de tempo
a_w	- Atividade da água
C	– Coesividade
D	– Dureza
E	– Elasticidade
M	– Mastigabilidade
H_i	– Humidade da fruta a cada instante i
\widehat{H}_i	– Humidade adimensional da fruta a cada instante i
H_{final}	– Humidade final fruta
$H_{inicial}$	- Humidade inicial fruta
m_i	– Massa de fruta a cada instante i
\widehat{m}_i	– Massa adimensional de fruta a cada instante i
$m_{inicial}$	- Massa inicial de fruta
m_{final}	– Massa final de fruta
N	– Newton
PPO	– Polifenoloxidase
PVP	– Polivinilpirrolidona
Taxa_{secagem i}	- Taxa de secagem no instante i
t_i	- Tempo de secagem no instante i
t_{i-1}	– Tempo de secagem imediatamente antes do instante i
TPA	– Texture Profile Analysis (Análise de Perfil de Textura)

I. Enquadramento do tema e objetivos

O consumo de fruta tem vindo a aumentar durante esta última década. Os consumidores estão cada vez a comer mais fruta à medida que conhecem os vários benefícios para a saúde, atribuídos aos constituintes da fruta como as fibras dietéticas, antioxidantes, vitaminas e minerais.

Na indústria alimentar em resposta às exigências dos consumidores tem sido notado avanços na tecnologia de processamentos de frutas, bem como a tentativa de aumentar a vida de prateleira deste tipo de produtos. Um dos métodos para a conservação de frutas é a secagem (desidratação), cujo principal objetivo é prolongar o tempo de vida útil sem necessidade de refrigeração durante o transporte e armazenamento. Este objetivo é conseguido através da relação entre o teor de humidade disponível e a água disponível para participar em reações químicas (atividade da água) para um nível que inibe o crescimento de microrganismos patogénicos, reduz a atividade das enzimas e a taxa de reações químicas indesejáveis (Smith e Hui, 2004; Somogyi *et al.*, 1996).

A secagem de alimentos é das operações mais antigas e comuns na indústria alimentar. Os secadores são frequentemente projetados para produtos específicos e a variedade de tipos de secadores é grande. Existem vários métodos ou processos para secar frutas podendo serem selecionados com base nas características da matéria-prima, requisitos do produto seco, tempo de secagem, eficiência energética, análise económica e financeira, considerações ambientais e de segurança (Valentas *et al.*, 1997). No caso das frutas, devido às suas características, a secagem é necessariamente um processo lento realizado sob condições suaves. Sempre que possível, a secagem solar é uma boa alternativa em termos económicos, nomeadamente em países tropicais. Contudo, também um pré-tratamento do alimento para acelerar o processo e/ou o uso de aditivos para evitar modificações bioquímicas indesejáveis, durante o extenso período de secagem, é por vezes necessário (Somogyi *et al.*, 1996).

O mercado de frutas e vegetais desidratados é muito importante para a maioria dos países. Por exemplo, nos EUA existe um grande mercado para a uva desidratada, alho, cebola e tomate. A produção mundial de passas, principalmente nos EUA (297.557 toneladas) e na Turquia (190.000 toneladas), foi cerca de 600.000 toneladas e avaliadas em mais de 125 milhões de dólares em 2000. O crescimento da popularidade de alimentos convenientes em muitos países asiáticos estimulou a procura crescente por frutas e vegetais

desidratados de alta qualidade. Esta tendência deverá continuar e até mesmo acelerar na próxima década em todas as economias emergentes do mundo (Zhang *et al.*, 2006).

Deste modo, Portugal deve acompanhar esta tendência estimulando o crescimento do setor agroalimentar, nomeadamente variedades regionais de pomóideas, para a criação de valor económico. Assim, o estudo científico desponta para a valorização do setor através do desenvolvimento de tecnologias, como a secagem.

É neste contexto que surge o presente trabalho, cujo intuito visa avaliar a qualidade do produto final fornecendo estratégias e dados relevantes para uma otimização do processo de secagem de frutas tradicionalmente portuguesas.

No sentido de atingir o propósito do trabalho, os objetivos foram:

- Estudar a cinética de secagem correlacionando as condições de operação (temperatura, humidade e velocidade do ar de secagem);
- Avaliar e monitorizar as modificações físico-químicas e bioquímicas (atividade da água, textura e atividade enzimática) do alimento em função do processo de secagem;
- Otimizar o processo relativo à cinética de secagem e à segurança e qualidade do produto final.

I.1. Maçã e Pera

I.1.1. Origem, morfologia e constituintes

Existem registos que remontam à pré-história, nos quais se evidenciam indícios que as pomóideas seriam uma das culturas utilizadas na alimentação dos povos, nomeadamente a secagem das maçãs para serem consumidas durante o inverno. A macieira é uma das árvores verdadeiramente indígena da Europa, facto este facilmente comprovado pela espontaneidade do seu aparecimento nos mais diversificados locais. Segundo inúmeros documentos escritos, já os Romanos plantavam cerca de 28 variedades de macieira, frutos mais apreciados pelos Gregos e Egípcios. A cultura da pereira é menos antiga que a da macieira, no entanto 2800 anos antes da nossa era, os Gregos cultivavam 4 variedades e 200 anos mais tarde cultivavam 41 (Bretaudeau e Fauré, 1991).

O aparecimento do fruto (vingamento) tem lugar em seguida à floração, graças à intervenção dos diferentes órgãos sexuais que constituem normalmente uma flor (Bretaudeau e Fauré, 1992). No caso dos frutos de pomóideas, tais como maçãs (*Malus pumila*) e peras (*Pyrus communis*), o fenómeno de fecundação desenvolve-se inteiramente nos órgãos florais através dos estames que libertam o pólen fecundado os óvulos encerrados nos ovários. A parte comestível deste tipo de frutos desenvolve-se através do alargamento do receptáculo que inclui e se funde com o ovário. A maçã e pera abrangem parte de uma das quatro ou cinco principais classes de fruta no que diz respeito à produção mundial (Seymour *et al.*, 1993).

A maçã apresenta uma forma variável (arredondada, alongada ou achatada); a cor da epiderme pode ser verde, parda, amarela, vermelha ou bicolor e a cor da polpa (branca ou amarela); o sabor mais ou menos doce e ligeiramente ácido; e uma textura farinhenta ou crocante (Assunção *et al.*, 2000).

Tal como a maioria dos frutos, o maior constituinte da maçã é a água (entre 80% a 90%). É um fruto tónico mas com poucas calorias uma vez que possui açúcares naturais como a frutose (5%), glucose (2,6%) e sacarose (1,7%). Normalmente uma maçã tem menos de 100 calorias (57 calorias/100 gramas). O ácido orgânico predominante é o ácido málico (550 mg/100g). As frutas são uma das principais fontes alimentares de ácido ascórbico (Vitamina C). A vitamina C apresenta-se em percentagens muito oscilantes consoante as variedades de maçã, embora exista maior quantidade na casca do que na

polpa. Contém também pequenas quantidades de vitaminas do grupo B e caroteno, precursor da vitamina A. No que diz respeito aos minerais, o potássio é o mineral mais abundante conferindo à maçã a característica de exercer um efeito alcalinizado no meio interno, ideal para equilibrar os excessos de acidificantes da comida moderna (excesso de carnes) (Goutier, 1989; Hulme, 1958).

Muitas culturas de maçã são usadas para a secagem mas a melhor qualidade de maçã seca fatiada é obtida da “Red Delicious” e da “Golden Delicious”. Os atributos de qualidade desejáveis de maçãs utilizadas para a secagem são a relação de açúcar e água, a cor e a redução de atividades enzimáticas indesejáveis. Apesar de ocorrer a perda de algumas vitaminas, as maçãs secas apresentam um valor energético muito elevado devido à concentração de açúcares (5 vezes mais calóricas), bem como as fibras e minerais que tendencialmente ficam mais concentrados (Belitz *et al.*, 2009; Hui, 2006).

A forma básica da pera varia desde a forma arredonda a fina, de sino, de ovo, de figo, cônica, globular e em forma de lágrima.

A polpa é normalmente mais firme do que as maçãs, mas quando amadurece amolece e derrete totalmente. Contudo, dentro das distintas variedades de peras podemos encontrar peras moles ou duras. A polpa das peras maduras para consumo é mole, sumarenta e doce, enquanto a das peras para cozinhar é dura e muitas vezes granulada. Uma das características da pera é a textura tipicamente arenosa que apresenta algumas variedades. A cor da epiderme varia desde um verde-acinzentado a um amarelo escuro (Bretaudeau e Fauré, 1992; Soares *et al.*, 2001).

A pera é um fruto típico pomo intimamente relacionado com a maçã, assim sendo, numa perspetiva global da sua composição bioquímica não são notáveis grandes diferenças entre os dois frutos. A pera possui ligeiramente maior quantidade de açúcares naturais, nomeadamente, frutose e sorbitol, em relação à maçã. Contudo a quantidade de glucose e sacarose na pera estão aproximadamente as mesmas proporções que as existentes na maçã. A maçã é um pouco mais ácida que a pera uma vez que o ácido málico é predominante e mais elevado na maçã, enquanto o ácido cítrico apresenta uma quantidade significativa na pera. As peras são também uma boa fonte de vitamina C, fibra e potássio.

A secagem de peras é relativamente generalizada em algumas regiões. Para uma adequada secagem as peras devem ter um tamanho médio de 3 cm de comprimento, estar completamente maduras de modo possuir o maior teor de açúcares e no fim da secagem

apresentarem uma cor canela. Estas podem ser secas inteiras, metades ou em pequenos pedaços, sem pele ou descascadas (Belitz *et al.*, 2009; Hui, 2006; Hulme, 1958).

I.1.2. Variedades em estudo – Maçã Malápio da Serra e Pera

Rocha

A Maçã Malápio da Serra é uma variedade regional da Beira Alta. Esta região caracterizada por um clima de invernos frios e rigorosos e verões quentes e secos com alta luminosidade potencia a produção de maçãs, com grande qualidade ao nível do aroma e sabor. A colheita desta maçã acontece normalmente em Outubro. A maçã pesa entre 140 a 150 gramas, com uma forma alongada ou alonga-cónica e com pedúnculos médios. A coloração é amarela esverdeada, a polpa é creme e podem exibir carepa dispersa por todo o fruto (Cooperativa Agrícola de Mangualde, 2012; DRAP Centro, 2009). Estudos recentes comprovaram grande riqueza em compostos bioativos, elevada atividade biológica e maior atividade antioxidante em comparação com as variedades exóticas (Serra, 2010).



Figura 1: Maçã Malápio da Serra.

A Pera Rocha é uma variedade exclusivamente portuguesa, produzida maioritariamente na Costa Central Oeste. Esta pera com denominação de origem produzida (DOP) tem o reconhecimento comunitário como um produto tradicional, de qualidades organoléticas excecionais, apreciadas e reconhecidas internacionalmente. A colheita sucede entre os meses de Agosto e Setembro. O fruto apresenta formas variáveis, de calibre 50/60 e de forma redonda oval. A sua cor é amarelo-verde claro e ostenta uma carepa típica à volta do pedúnculo. A polpa da pera é branca, macia-crocante, doce e muito sumarenta (ANP, 2012).



Figura 2: Pera Rocha.

I.2. Secagem

I.2.1. História, definição e objetivos da secagem

A secagem de alimentos perecíveis é o método mais antigo e barato de conservação através da utilização do sol. Diversos autores indicam que no período paleolítico, há 400.000 anos, os nossos antepassados já secavam alimentos ao sol como carnes, peixes e grãos. Todavia, hoje em dia a indústria agroalimentar utiliza a desidratação para um grande número de produtos, como por exemplo: produtos lácteos e derivados (leite em pó instantâneo, semi-produtos em pó para gelados e sobremesas), produtos derivados de cereais (alimentos para bebés com carnes e frutas, farinhas com frutas e mel, pastas), produtos obtidos do café, chá e cacau, produtos vegetais (purés de batata, frutas secas) e produtos de origem animal (ovos) (Casp e Abril, 1999).

O objetivo básico da secagem é remover a água para um nível em que a contaminação microbiológica e as reações químicas e enzimáticas são minimizadas com a finalidade de prolongar a vida de prateleira do produto. Para além deste aumento de estabilidade, existe uma redução do peso e volume dos produtos contribuindo para diminuição de custos de embalagem, manuseio, armazenamento e transporte, bem como, a disponibilidade do produto durante todo o ano. No entanto, este processo de conservação implica um consumo substancial de energia e afeta as características naturais dos alimentos, como a cor, o sabor, a textura e valor nutritivo devido às transformações físicas, químicas, biológicas que ocorrem durante a desidratação. Deste modo, um segundo objetivo da secagem é a produção de alimentos secos de boa qualidade relativo às características nutricionais e organoléticas. A imagem do “natural” associado a este tipo de produtos secos faz com que

a indústria alimentar fabrique produtos de alto valor acrescentado, como por exemplo as frutas secas ou para a utilização destas em cereais de pequeno-almoço e snacks (Valentas *et al.*, 1997).

I.2.2. Processo de secagem

A secagem é uma operação unitária na qual um líquido, geralmente água, é removido de um sólido húmido, num equipamento designado por secador. O uso de calor para remover líquidos distingue a secagem de outros métodos mecânicos de remoção de líquidos como a centrifugação, decantação ou sedimentação, e filtração, nos quais não existe mudança de fase de líquido para vapor.

Existem dois processos de transporte simultâneos durante a secagem: transferência de calor do ambiente externo à superfície do alimento combinado com a transmissão de calor de dentro do alimento por condução; e a transferência de massa do interior para a superfície do alimento seguido por transporte externo da humidade para o ambiente externo (Brennan, 2006).

Quando a secagem se faz recorrendo a gases aquecidos o sólido húmido começa a secar como se a água estivesse presente sem a presença do sólido. Este estágio inicial é comumente designado por período de secagem a velocidade constante, porque a evaporação ocorre a uma velocidade constante e é independente do sólido. Nos estágios seguintes a secagem depende das forças que governam o fluxo de líquido dentro do sólido. Na maior parte dos casos, o mecanismo do fluxo interno resulta de uma combinação das forças devidas a fenómenos de capilaridade, processos de difusão, gradientes de pressão interna causados pela retração do sólido, fluxo sequencial de vapor e líquido devido a gradientes de temperatura, e osmose. Devido à complexidade do mecanismo de fluxo interno não tem sido possível desenvolver uma teoria generalizada de secagem aplicável a todos os materiais. Apenas na secagem de certos objetos, como a madeira, a cerâmica e o sabão, existe um mecanismo interno conhecido que permite o controlo da qualidade do produto final (Brennan, 2006; Jangam *et al.*, 2010).

A maioria dos estudos de secagem consiste na análise do efeito de parâmetros externos (velocidade, humidade e temperatura do ar, assim como a forma do material húmido) na velocidade de secagem. Os resultados destas investigações são geralmente apresentados na

forma de curvas de secagem que relaciona o conteúdo de humidade com o tempo de secagem e ainda, através da representação gráfica da velocidade de secagem em função humidade média do sólido. Nestas curvas é possível identificar quatro períodos de secagem.

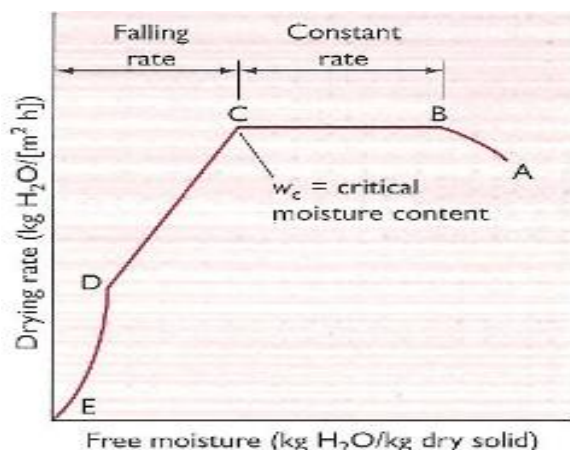


Figura 3: Curva de velocidade de secagem em função da humidade livre (Singh e Heldman, 2001).

O primeiro período de secagem ou período de adaptação ou pré-aquecimento (compreendido entre os pontos A e B) ocorre imediatamente após o contacto do sólido com o ar. Neste período a temperatura do sólido ajusta-se até atingir o estado estacionário, ou seja, a temperatura da superfície sólido húmido iguala a temperatura do termómetro húmido do gás de secagem, para condições de estado estacionário.

No período compreendido entre os pontos B e C a velocidade de secagem permanece constante até que toda a superfície do sólido deixa de estar completamente molhada (ponto C). O período de velocidade constante pode manter-se à medida que a secagem se processa, se existir um mecanismo responsável pela vinda de água do interior para a superfície do sólido a uma taxa suficiente para manter a totalidade da superfície húmida. No final deste período o sólido atinge-se a humidade crítica (W_c). A humidade crítica não é uma propriedade do alimento, mas depende do tamanho da partícula e das condições do ar de secagem. Após este ponto, a velocidade de secagem é governada por fatores que afetam a transferência de humidade dentro do sólido e a influência de fatores externos, tais como a velocidade do ar é reduzido comparativamente à com o período de velocidade constante. Esta redução brusca de transferência à superfície causa uma diminuição da velocidade de secagem.

No período de velocidade decrescente (compreendido entre os pontos C e E) a temperatura da superfície do sólido sobe e a velocidade de secagem decresce continuamente até que o sólido atinge a humidade de equilíbrio (X_{eq}), ou seja, a humidade livre igual a zero. O período de velocidade decrescente pode compreender um período de velocidade linear e outro, mais rápido, não linear. A forma da curva de secagem no período de velocidade decrescente depende do mecanismo pelo qual a água no interior do sólido se move para a superfície. No caso de sólidos orgânicos, a humidade existente neste tipo de sólidos faz parte integrante da sua estrutura ou está aprisionada no interior das fibras ou poros interiores muitos pequenos assim, o movimento da humidade é lento e ocorrerá por difusão da água através da estrutura do sólido. A resistência à transferência de vapor de água da superfície sólido para o ar é usualmente desprezável, o que significa que a difusão da água através do sólido controla a velocidade de secagem. Neste período as camadas superficiais tendem a secar mais rapidamente do que o interior, podendo ocorrer o desenvolvimento de uma carapaça de material seco impermeável ao fluxo de água ou vapor de água. As condições de secagem são críticas para este tipo de materiais, assim sendo, estas devem ser selecionadas tendo em conta a qualidade do produto final. Uma boa solução é o uso de ar de secagem mais húmido de maneira que as deformações, endurecimento e quebra da superfície do sólido da superfície sejam reduzidas (Coulson, 1977; Foust *et al.*, 1980; McCabe *et al.*, 1993).

I.2.3. Secagem de frutas

Quando se seleciona o secador ou o método de secagem importa saber que comumente as frutas são caracterizadas pelo elevado conteúdo de humidade inicial, elevada sensibilidade a alta temperatura (detioração da cor, sabor, textura, valor nutricional), elevada suscetibilidade ao ataque microbiológico e presença da pele em alguns frutos que tem uma fraca permeabilidade para a água. As frutas podem ser secas de várias formas (inteiras, fatiadas e puré), logo diferentes tipos de secadores podem ser usados para a secagem (Jangam *et al.*, 2010).

A secagem das frutas é um processo necessariamente lento e sob condições suaves, de modo a evitar mudanças indesejáveis ao produto seco. As frutas são materiais higroscópios. O material húmido é chamado higroscópio se a água que nele contém é

ligado à matriz sólida, de tal forma que a pressão de vapor exercida é menor do que da água pura à mesma temperatura. Geralmente, o período de velocidade constante não é detetável neste tipo de materiais (Somogyi *et al.*, 1996; Hui *et al.*, 1996).

Lahsani *et al.* (2004) estudou a cinética de secagem convectiva de uma espécie de pera (*Opuntia ficus indica*) concluindo que a temperatura é o parâmetro mais influente na cinética de secagem. Verificou, também o aumento da taxa de secagem com aumento de temperatura e de velocidade do ar (Lahsani *et al.*, 2004). Para além disto, outros investigadores demonstraram o aumento da difusidade com a subida da temperatura e da velocidade do ar (Park *et al.*, 2001; Vega-Galvez *et al.*, 2012). Contudo, embora a temperatura favoreça a velocidade de secagem, o seu aumento traduz-se normalmente numa quebra da qualidade do produto final a nível nutricional, como a atividade antioxidante e compostos fenólicos e, a nível sensorial como o aumento da sua dureza (Vega-Galvez *et al.*, 2012).

Em Portugal, na região da Beira Alta, há a tradição de secar artesanalmente (ao sol) as peras da variedade de S. Bartolomeu, obtendo-se um produto extremamente apreciado por consumidores de todo o mundo: Pera Passa de Viseu. Dadas as características de adstringência e textura “arenosa”, a pera de S. Bartolomeu tem valor comercial apenas na forma seca. A pera caracteriza-se por ser de pequeno tamanho, com uma cor vermelho acastanhado e com características organoléticas únicas em termos sabor e textura.

A produção deste produto agroalimentar envolve várias etapas que passo a citar sucintamente. A primeira etapa consiste na colheita manual e decorre durante o mês de agosto. É de extrema importância a maturação completa da pera antes da apanha, de modo a obter uma passa mais escura, mais macia e doce. Após a colheita, a pera é descascada manualmente sem remover o pedúnculo. Depois as peras são colocadas em passeiras (constituídas por uma cama de caruma de pinheiro) onde ficam cerca de quatro a seis dias ao sol. Mais tarde as peras são retiradas à hora de maior calor e colocadas em cabazes ou cestos a fim de serem calcadas e abafadas. Estes cestos são cobertos com mantas e guardados à sombra cerca de dois dias. Os frutos depois de espalmados são colocados novamente nas passeiras permanecendo ao sol durante mais dois a quatro dias. A pera secada é depois embalada em sacos, para posterior comercialização. Porém este produto é bastante sensível à humidade, urgindo o estudo de estratégias de intervenção ao nível da produção, bem como a qualidade e segurança do produto final, com o intuito de proteger e

promover este produto alimentar tradicionalmente português (Associação para o Estudo e Promoção das Artes Culinárias, 2009; Ferreira, 2003)

I.2.4. Método de secagem

Antigamente a maioria das frutas eram secas ao sol, apesar de agora existir uma tendência para os métodos mecânicos, de modo a comercializar em larga escala deste tipo de produtos, garantindo a sua segurança e qualidade ao consumidor (Somogyi *et al.*, 1996).

Os métodos de secagem foram sendo desenvolvidos com base nos requisitos e especificações de cada produto alimentar. O processo de secagem pode ser feito com recurso a diferentes classes de equipamentos e pode ser classificado de acordo com o seu tipo de funcionamento: descontínuo, onde o material é introduzido no secador e a secagem decorre durante um dado período de tempo; ou em contínuo, o material é continuamente alimentado ao secador e o material seco é continuamente removido. Também se classificam de acordo com o modo como é feito o aquecimento: aquecimento direto que consiste no contacto direto entre o sólido e o gás quente (normalmente ar); ou aquecimento indireto, em que o calor é fornecido ao sólido de um meio externo (vapor condensante) através de uma superfície metálica em contacto com o material. E ainda, consoante o modo de operação (Smith e Hui, 2004).

Atualmente a grande parte dos produtos desidratados, nomeadamente as frutas, são secas por gases quentes (ar quente, gases de combustão ou vapor pré-aquecido) pois é uma técnica mais simples e económica. Neste método de secagem, o calor necessário é fornecido por convecção do gás quente em contacto direto com o alimento num equipamento denominado secador.

O secador de túnel consiste num longo túnel isolado. Os alimentos são colocados em tabuleiros ou vagonetas que se deslocam continuamente através de um túnel. Uma corrente de ar quente passa sobre cada tabuleiro e/ou através dos tabuleiros perfurados e das camadas dos alimentos. O ar pode fluir em paralelo e na mesma direção que as vagonetas (co-corrente) ou em contracorrente ou, ainda, numa combinação das duas. Os túneis podem ser de 25m de comprimento e cerca de 2m em secção transversal. Tendo em consideração o aumento da eficiência térmica do secador e a economização da energia, a recirculação do ar de secagem é muitas vezes aproveitada. Os secadores de túnel são amplamente

utilizados e usados principalmente para secar frutas em fatias ou cubos e legumes (Brennan, 2006).

Neste método de secagem as condições de secagem controladas são a temperatura, a humidade relativa e velocidade do ar de secagem. Estes fatores controláveis influenciam significativamente a taxa de secagem, porém a distribuição, a geometria, a espessura e características do produto também podem influenciar.

Um dos aspetos mais importantes da secagem ao nível industrial é prever o comportamento da mesma para aumentar a eficiência do processo. A velocidade de secagem, a estabilidade de armazenamento, as características de reidratação e as mudanças de qualidade dependem do tipo de secador, dos parâmetros de processamento e do pré-tratamento do material a secar.

Investigações crescentes sobre a qualidade do produto e de custos de produção têm motivado os investigadores a investigar e a adotar tecnologias de secagem com a combinação de outras técnicas. As vantagens de combinar a secagem com outras técnicas originam tempos de secagem mais curtos, melhoria da qualidade do produto e flexibilidade na produção de uma grande variedade de produtos secos (Zhang *et al.*, 2006).

I.3. Propriedades e modificações físico-químicas e bioquímicas da fruta durante a secagem

I.3.1. Atividade da água

Quando falamos de secagem remete-nos para a redução do conteúdo de humidade no alimento mas sob um ponto de vista de conservação a atividade de água (a_w), fator muito relevante. Este conceito foi introduzido em 1957 pelo microbiólogo Scott e nos dias de hoje, juntamente com a temperatura, são dos parâmetros mais importantes na influência das reações de deterioração dos alimentos (Belitz *et al.*, 2009).

A atividade de água (a_w) pode ser definida como a quantificação da extensão de água disponível ou indisponível para interações de hidratação, crescimento microbiano e reações químicas e enzimáticas (Chen e Mujumdar, 2008). Quando a água interage com o soluto esta não está totalmente disponível para estas interações. A atividade de água é uma propriedade do equilíbrio de um sistema em qualquer fase que contenha água, e é expressa

como a razão entre a pressão parcial da água no alimento e a pressão de vapor de água pura à mesma temperatura. Esta relação é numericamente equivalente à humidade relativa de equilíbrio. O valor de a_w está compreendido entre 0 e 1 e é tanto mais baixo quanto maiores as forças de união físico-químicas e tende para 1 quando a água se aproxima do estado livre e se evapora como água pura. Atividade de água de um alimento é sempre menor que 1, indicando que os seus constituintes fixam parcialmente a água diminuindo a sua capacidade de vaporizar (Chen e Mujumdar, 2008; Rahman, 2007).

Normalmente um produto alimentar contém simultaneamente várias formas de água: água livre, água fracamente ligada e água fortemente ligada. Nos produtos mais hidratados, como é caso da maior parte das frutas e legumes, uma parte importante de água está na forma de água livre e água fracamente adsorvida (retida por capilaridade nos tecidos do alimento). Durante a desidratação, as moléculas de água menos ligadas são as primeiras a ser removidas e, posteriormente as moléculas de água da estrutura (fortemente ligadas por uniões eletrostáticas a macro moléculas do extrato seco) vão sendo extraídas (Belitz *et al.*, 2009; Chen e Mujumdar, 2008).

A temperatura constante existe uma relação entre o conteúdo de humidade e a atividade da água, pela isotérmica de equilíbrio. Tradicionalmente, esta relação pode ser representada através de uma curva que se divide de forma mais ou menos arbitrária em três partes. Na primeira parte (intervalo: $0 < a_w < 0,2$), o produto contém muita pouca água, atuando forças de Van der Waals muito intensas e as moléculas de água presentes estão muito ligadas a pontos ativos, como moléculas de grupos polares ou pontes de hidrogénio. As moléculas orgânicas, particularmente as macromoléculas polares como as proteínas estão mais ou menos saturadas por uma camada monomolecular de água fortemente ligada. Na zona intermédia (intervalo: $0,2 < a_w < 0,6$), a água encontra-se sob forma de camadas polimoleculares que revestem a superfície do substrato seco, as moléculas estão ligadas mas fracamente ligadas. Esta água está disponível como solvente para solutos de baixo peso molecular e algumas reações bioquímicas. Este tipo de constituição de água pode entender-se como um estado de transição contínuo entre a água ligada e a água livre. A última parte (intervalo: $a_w < 0,6$) corresponde à fração de água livre que se encontra em estado líquido e que está retida na superfície do substrato seco apenas por forças de capilaridade. Esta é a única fração de água verdadeiramente disponível para as reações

químicas e enzimáticas. Isto implica que esta fase proporciona as condições para o crescimento microbiano e as reações de deterioração dos alimentos (Casp e Abril, 1999).

A curva isotérmica pode ter dois sentidos (adsorção e desadsorção) dependendo de como o estado de equilíbrio isotérmico foi alcançado. Quando existe um aumento do conteúdo de humidade designa-se adsorção, se existe uma diminuição do conteúdo de humidade (caso da secagem) designa-se desadsorção. Normalmente, a isotérmica de adsorção apresenta menor conteúdo de humidade para a mesma atividade de água em relação à isotérmica de desadsorção o que significa que as duas curvas não são sobrepostas. Este fenómeno denomina-se histerese e ocorre, quando a adsorção e a desadsorção são repetidas com a mesma amostra, principalmente devido à reidratação (mudanças na superfície do alimento após adsorção) e à variação da a_w com a temperatura (Barbosa-Cánovas e Vega-Mercado, 1996; Brennan, 2006; Casp e Abril, 1999; Chen e Mujumdar, 2008).

A água pode participar em inúmeras reações químicas como solvente, reagente, produto (por exemplo reações não enzimáticas de escurecimento) e modificador (catalisadores ou inibidores de atividades) (Smith e Hui, 2004). Deste modo, a a_w é uma das melhores formas de antever e conferir a deterioração dos alimentos e determinar o seu tempo de prateleira. A influência da atividade da água na estabilidade dos alimentos pode ser vista de uma forma muito sucinta através da figura 4 que relaciona o conteúdo de humidade em função da atividade da água.

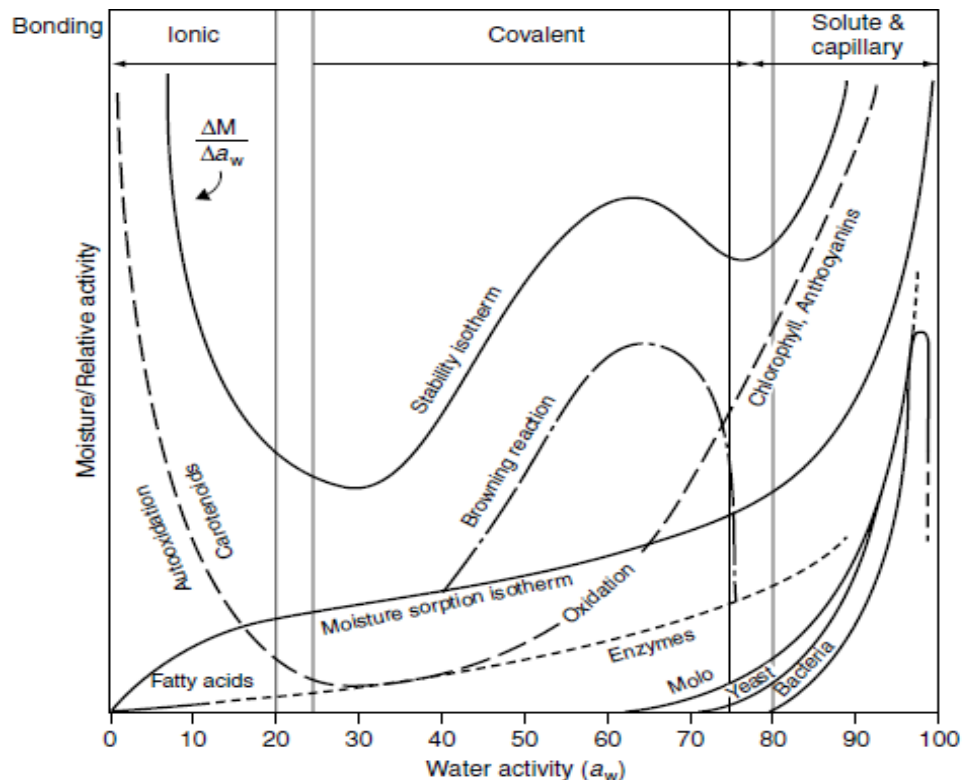


Figura 4: Estabilidade dos alimentos em função da atividade de água (Rahman, 2007).

Em muitos alimentos a taxa de oxidação da gordura atinge valores mínimos entre valores de a_w de 0,2 e 0,4, contudo este não é uma reação de deterioração para a maioria das frutas, uma vez que apresenta quantidades residuais de lípidos.

A taxa de escurecimento não enzimático é mais elevada no intervalo de 0,4-0,6 de a_w , pois demasiada água inibe a reação por diluição e também excessivamente pouca água oferece uma mobilidade inadequada. O mesmo acontece para as reações hidrolíticas que também são mais rápidas na gama de 0,4-0,7 de a_w .

A atividade enzimática pode surgir quando as enzimas não são inativadas pelo calor através de enzimas endógenas presentes no alimento ou de enzimas termo resistentes provenientes de microrganismos. As reações enzimáticas ainda não estão completamente percebidas, mas sabe-se que a valores de a_w baixos começam a aumentar muito lentamente, pois há uma falta de mobilidade de difusão do substrato ao centro ativo da enzima. A partir da a_w aproximadamente igual a 0,8 a atividade enzimática acelera repentinamente.

A maioria dos fungos não vai crescer abaixo do valor de a_w de 0,7 (leveduras 0,8). Quanto às bactérias normalmente não vai crescer abaixo de 0,9. No entanto, é necessário salientar que muitos outros fatores influenciam a atividade dos microrganismos como a

temperatura, disponibilidade de oxigénio, nutrientes e pH (Barbosa-Cánovas e Vega-Mercado, 1996; Brennan, 2006).

A conservação dos alimentos pela secagem ocorre principalmente devido à inibição do crescimento microbiano, contudo, os microrganismos não são necessariamente eliminados. Sob o ponto de vista qualitativo e quantitativo, os microrganismos presentes num alimento processado dependem da qualidade microbiológica do produto fresco e dos procedimentos seguidos até ao se embalamento. A multiplicação de microrganismos não deve ocorrer em alimentos corretamente desidratados porém, não estão imunes aos esporos. A redução da atividade de água de um produto inibe o crescimento microbiano, mas não o torna estéril.

O controlo microbiano é normalmente baseado no número total de microrganismos indicadores ou número de patogénicos. As temperaturas usadas deverão ser as mais altas possíveis, de modo a maximizar a morte térmica. Porém, uma secagem com temperaturas mais baixas é melhor para manter algumas características organoléticas. Uma alternativa para contornar esta problemática da temperatura de secagem é o uso de uma temperatura mais elevada inicialmente, quando o conteúdo de humidade é alto, e depois continuar a secar a temperaturas mais baixas ou recorrer a um pré-tratamento (Chen e Mujumdar, 2008).

I.3.2. Textura

As características da textura de um alimento é um dos primeiros parâmetros de qualidade avaliados pelos consumidores, sendo fundamental para a aceitação ou rejeição do produto. Segundo a International Organization of Standardization 5492, de 1992, a textura define-se como: “todos os atributos mecânicos, geométricos e de superfície de um produto, perceptíveis por intermédio de recetores mecânicos, táteis e, quando apropriados, visuais e auditivos.”

A textura pode surgir de variados estímulos e a maioria das medições instrumentais tende a concentrar-se numa propriedade reológica do alimento. É fundamental avaliar, prever e controlar a textura dos alimentos, particularmente no que toca aos efeitos do processamento como a secagem, com objetivo de otimizar a qualidade do produto final.

Existem diversas abordagens para as medições instrumentais de textura. A Análise do Perfil de Textura (TPA) é um dos métodos para determinar parâmetros de textura dos

alimentos, através da simulação ou imitação das condições a que os mesmos são sujeitos na boca. Os parâmetros de textura medidos podem ser: a dureza, a coesividade, a elasticidade e a mastigabilidade. Estes estão relacionados com a reação do material a uma situação de tensão aplicada, por uma força de compressão.

A dureza é medida como a força requerida para alcançar uma determinada deformação ou penetração de um produto. Na boca é percebida pela compressão do produto entre os dentes. A coesividade reflete a resistência das ligações internas que constituem o material e está relacionada com o grau de deformação antes de quebrar. A elasticidade traduz a rapidez com que material recupera de uma força de deformação. Sensorialmente indica a intensidade da sensação elástica que o alimento causa na boca. A mastigabilidade é a energia requerida para mastigar um alimento sólido até que esteja pronto para engolir (Rosenthal, 1999).

Durante o processo de secagem são observadas diversas alterações de natureza física nos alimentos. Quando expomos o alimento a uma corrente de ar quente, o primeiro efeito é a evaporação da água na sua superfície húmida. A concentração de solutos na superfície aumenta, a água de soluções diluídas de camadas mais profundas movem-se em direção à superfície através das paredes celulares, como resultado do gradiente de concentração. Esta perda de fluido celular provoca uma contração do volume da célula. A primeira fase desta contração é a depressão da camada superficial de células, produzindo um encolhimento no núcleo húmido e incompressível. Com a continuação da secagem, a contração começa a manifestar-se por todo o alimento, embora o centro permaneça húmido (Chen e Mujumdar, 2008; Jangam et al., 2010).

O encolhimento ou contração é um fenómeno esperado quando secamos produtos alimentares, como as frutas. E ocorre devido à natureza físico-química da matriz sólida dos alimentos e às condições de processamento (temperatura e velocidade de secagem). É importante perceber que o encolhimento dos alimentos não é uniforme dentro da dimensão do material, é diferencial, pois as camadas exteriores encolhem em relação às camadas internas, levando a pequenas rachaduras e fissuras.

Quando a humidade da superfície do produto é removida mais rapidamente do que a difusão da água no interior do alimento pode ocorrer o endurecimento. O encolhimento na região da fronteira, onde a água é extraída rapidamente, desempenha um papel fundamental na restrição da transferência de humidade e contribui para uma perceção

sensorial agradável de textura durante a degustação. No entanto, o endurecimento, desde que controlado, é uma característica desejável, pois geralmente os alimentos secos são conhecidos como mais difíceis de mastigar em comparação ao seu estado antes de secar (Chen e Mujumdar, 2008).

A secagem de alimentos é um processo complexo cujos mecanismos ainda não estão inteiramente percebidos. A perda de água e a perda de integridade da parede celular originam tecidos mais flácidos e menos crocantes ou mesmo uma textura borrachosa (Brett e Waldron, 1998). As principais alterações dos parâmetros de textura caracterizam-se por uma diminuição da dureza, da firmeza e da gomosidade e um aumento da coesividade, da elasticidade e da adesividade (Ferreira, 2003; Lopéz, 2006).

A textura resulta de interações complexas entre os diferentes componentes dos alimentos. As alterações que ocorrem na textura de frutos e vegetais durante o processamento estão relacionadas com as alterações ao nível micro-estrutural nas células, nomeadamente perda da integridade da parede celular e da lamela média, alterações na adesão celular, mudanças estruturais em frações pécticas e aumento da solubilidade dos polissacarídeos das paredes celulares (Ferreira *et al.*, 2008; Waldron *et al.*, 1997; Mafra *et al.*, 2006).

I.3.3. Escurecimento enzimático

Existem diversas situações que podem causar o escurecimento de frutas, contudo uma característica comum é o contacto entre os compostos fenólicos localizados predominantemente nos vacúolos e nas enzimas oxidativas situadas no citoplasma, que acionam o escurecimento aquando a descompartimentação celular (Lee e Whitaker, 1995). O acastanhamento enzimático é uma das mais importantes reações de cor que afeta as frutas, vegetais e alimentos do mar de uma forma positiva ou negativa. Estas reações podem contribuir para a aceitação global de alimentos como chá, café, cacau e frutas secas (passas, ameixas, tâmaras e figos).

O acastanhamento enzimático é catalisado pela PPO que catalisa a oxidação de compostos fenólicos a quinonas, que finalmente polimerizam a melanoidinas (ou melaninas) coloridas. Estes produtos de escurecimento enzimático desempenham papéis

fisiológicos chave. As melanoidinas podem apresentar propriedades antibacterianas, antitumorais, antifúngicas e antioxidantes (Hui, 2006).

A polifenoloxidase (1,2 benzenodiol; oxigénio oxidoreductase; EC 1.10.3.1), também conhecida como tirosinase, fenolase, catecol oxidase, catecolase, o-difenol oxidase, monofenol oxidase e cresolase, foi descoberta em cogumelos, em 1856 por Shoenbein. O peso molecular da polifenoloxidase nas plantas varia entre 57 e 62 kDa (Whitaker *et al.*, 2003).

A polifenoloxidase (PPO) é composta por um grupo de enzimas complexas que catalisam a oxidação dos compostos fenólicos para produzir pigmentos acastanhados em superfícies cortadas ou danificadas de frutas e vegetais. Estudos na distribuição da PPO em maçãs, por exemplo, parecem ser inconsistentes. Embora presentes em todas as partes da fruta, alguns relatórios indicam níveis substanciais mais elevados na casca do que na polpa, enquanto outros encontraram níveis mais elevados de PPO no córtex do que na casca. Demonstrou-se que a PPO em cinco culturas de maçã são maioritariamente localizadas perto do centro e secundariamente perto da pele. Durante o amadurecimento, a concentração de partículas de enzimas diminui com o aparecimento da fração solúvel. Na maçã madura, onde os vacúolos ocupam a maioria das células, a PPO foi detetada imune quimicamente perto das paredes celulares com o uso de anticorpos anti-PPO da maçã. Nas células imaturas das frutas e na cultura de tecidos, a PPO foi detetada em outros organelos para além dos vacúolos, provavelmente em plastos (Lamikanra, 2002).

A PPO catalisa duas reações básicas: hidroxilação da *o*-posição adjacente para um grupo hidroxilo existente de um substrato fenólico (atividade monofenol oxidase); 2) oxidação do difenol para o-benzoquinonas (atividade difenol oxidase). A PPO é também referida como a tirosinase por descrever ambas as atividades de monofenol e difenol oxidase em plantas e animais.

A monofenoloxidase que atua em plantas é chamada cresolase devido à capacidade de se ligar ao cresol como substrato. Esta enzima é capaz de metabolizar aminas aromáticas e o-aminofenóis. A oxidação dos substratos difenólicos para quinonas na presença de oxigénio catalisado pela difenol oxidase. A reação da p-difenol oxidase catalisada segue um mecanismo Bi-Bi. A atividade da difenolase deve-se a duas enzimas diferentes: catecolase (catecol oxidase) e a lacase. A lacase (p-diphenol oxidase, EC 1.10.3.2) (DPO) é um tipo de polifenol oxidase que contém cobre. Esta é a única com capacidade para oxidar

p-difenois. A catecol oxidase e a lacase são distinguíveis com base nos substratos fenólicos e nas especificidades dos seus inibidores. A catecol oxidase é mais importante do que a ação da cresolase em alimentos, porque a maioria dos substratos fenólicos em alimentos são dihidroxifenóis. O esquema abaixo sintetiza o mecanismo de ação da PPO.

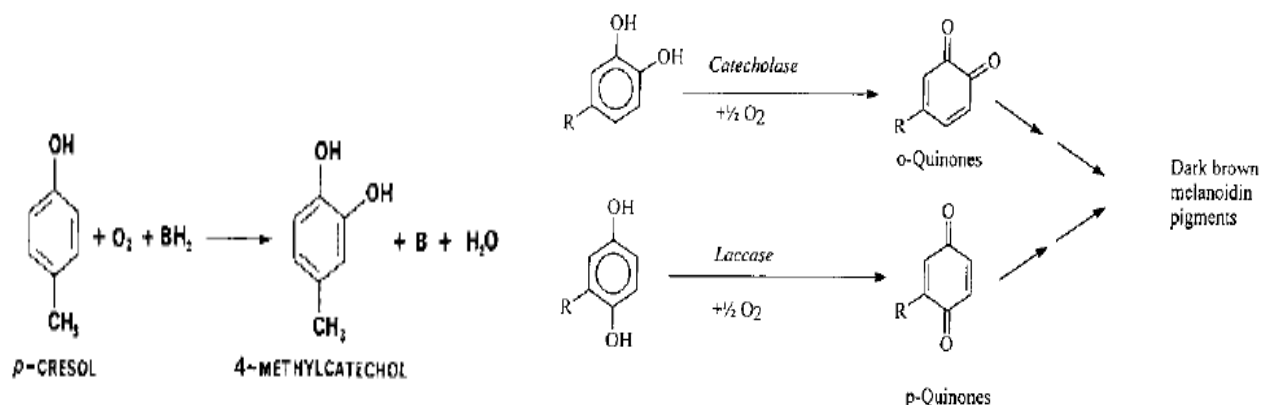


Figura 5: Mecanismo da polifenoloxidase (Whitaker *et al.*, 2003).

A tirosina é o substrato principal para certas fenolases, contudo outros compostos fenólicos como o ácido cafeico e o ácido clorogénico também servem como substratos. Estruturalmente contêm um anel aromático tendo um ou mais grupos hidroxilo, juntamente com uma série de outros substituintes. A especificidade do substrato da PPO varia de acordo com a fonte da enzima. Os compostos fenólicos mais importantes na maçã e na pera são os ácidos hidroxicinâmicos (ácido cafeico e *p*-cumárico) e os seus derivados e os flavonóides (Hui, 2006). Estes frutos caracterizam-se pela predominância em ácido clorogénico (ou ácido 5-cafeoilquínico). Quanto aos 3-flavanóis mais frequentemente encontrados são as catequinas e as procianidinas (Lamikanra, 2002).

A relação entre o conteúdo de compostos fenólicos e a atividade da PPO é diretamente responsável pela reação de escurecimento das frutas durante a pós-colheita e processamento, bem como a temperatura, o pH e a disponibilidade de oxigénio nos tecidos (Hui, 2006).

A atividade da PPO é geralmente superior nos frutos verdes do que nos frutos maduros, contudo a maturidade da maçã não parece influente no envolvimento do escurecimento (Lamikanra, 2002; Lee e Whitaker, 1995). A PPO não tem um pH ótimo, apresentando-se ativa numa elevada gama de valores de pH (3 e 7). Os valores abaixo de pH 3 a enzima é irreversivelmente inativada (Hui, 2006).

Quanto à aplicação de tratamento térmico a PPO de várias frutas apresenta grande resistência, no entanto é o método mais eficaz para inativar a enzima, sem contar com uso de inibidores enzimáticos como os agentes quelantes, agentes complexantes, acidulantes entre outros. T. Wakayama estudou atividade da PPO de várias culturas de maçã e verificou que em todas têm maior atividade no centro seguido da polpa e casca. Reportou, ainda o efeito da temperatura numa gama de 1°C a 80°C na atividade enzimática. Conclui, que a atividade máxima foi exibida a 30°C com uma relativa ampla gama de estabilidade térmica. A atividade da PPO foi instável a elevadas temperaturas como, por exemplo, a atividade relativa da PPO diminui de 49% para 13% em função do aumento da temperatura de 50°C para 60°C e depois foi reduzida para um nível indetetável a temperatura acima de 70°C. Este resultado está de acordo com a estabilidade térmica da maçã reportado por Trejo-Gonzalez e Soto-Valdez, Zhou et al. e Murata et al. A temperaturas relativamente mais baixas observou que a atividade foi diminuindo. Quando a reação foi realizada a 10°C, 5°C e 1°C, a atividade relativa foi reduzida para 30%, 20% e 13%, respetivamente. Isto indicou que atividade da PPO foi em grande parte suprimida a temperaturas abaixo de 10°C (Lee e Whitaker, 1995).

No que diz respeito ao comportamento da PPO durante a secagem de frutos e vegetais, foi reportado que a sua atividade diminuía significativamente ao longo do processo. Verificou-se que a atividade da PPO foi superior a uma temperatura de secagem de 30°C e a temperaturas superiores potenciam esta mesma diminuição, ainda que uma secagem ao sol parece ineficaz para inibir a PPO (Jaiswal *et al.*, 2010; Fernandes *et al.*, 2011).

A PPO é mais resistente à pressão do que ao tratamento térmico. Vários estudos indicam que as pressões relativamente baixas (até 400MPa) induzem o aumento da atividade enzimática enquanto as pressões acima de 400MPa conseguem diminuir a atividade da enzima PPO (algumas vezes combinado com calor moderado) (Queiroz *et al.*, 2008). Uma vez que o escurecimento enzimático é uma alteração física desejada durante a secagem, importa relatar quando a PPO é ativada pelo tratamento de alta pressão (pré-tratamento) com a finalidade de modular o escurecimento no processo de secagem de frutas. Estudos revelaram que nas framboesas a PPO foi ativada em 15% e 8% pelo processamento de alta pressão a 400MPa e 800MPa, respetivamente, durante 5 minutos. A PPO só foi inativada quando tratada durante 15 minutos a 800MPa (Garcia-Palazon *et al.*, 2004).

Nas maçãs pressurizadas numa gama de 200-600MPa, durante 10 minutos, adquiriram uma cor acastanhada bastante acentuada, e após tratamento, à temperatura ambiente e a pressão normal, adquiriram uma cor ainda mais marrom (Barbosa-Cánovas e Gould, 2000; Gomes e Ledward, 1996). Após tratamento das peras à pressão de 400MPa, à temperatura de 25°C e durante 10 minutos, estas apresentaram uma cor claramente mais escura. Nas peras não pressurizadas não se observou nenhuma mudança de cor acentuada durante esse período. A atividade da PPO das peras pressurizadas foi cinco vezes mais elevada do que a das peras não sujeitas ao tratamento (Asaka e Hayashi, 1991).

No entanto, é importante referir que o escurecimento na desidratação de frutas não é exclusivo da atividade da PPO existem outro tipo de reações não enzimáticas que contribuem para a mudança de cor neste tipo de alimentos, como as Reações de Maillard. São uma das reações mais complexas na química dos alimentos devido ao elevado número de componentes capazes de participar na reação através de diferentes vias, dando origem a uma mistura complexa de produtos. Os compostos de Amadori são formados durante os primeiros passos de Reações de Maillard e foram detetados em frutas desidratadas (Belitz *et al.*, 2009; Coimbra *et al.*, 2011).

II. Material e métodos

De acordo com os pressupostos do trabalho, a metodologia aplicada pôde ser dividida em duas grandes etapas: na primeira etapa, realizada no Departamento de Mecânica da Universidade de Aveiro, procedeu-se aos ensaios de secagem; na segunda etapa, realizadas no Departamento de Química, analisou-se a atividade de água (a_w), textura e atividade enzimática da PPO das amostras secas e pressurizadas e, por fim, avaliou-se sensorialmente algumas amostras secas.

II.1. Secagem

II.1.1. Preparação das amostras de pera e de maçã

As amostras de Pera Rocha foram adquiridas localmente, enquanto as Maçãs Malápio da Serra foram obtidas a partir de um produtor da zona de Mangualde. Até serem secas, a fruta foi armazenada sob refrigeração a 4°C. Antes de cada ensaio as amostras foram lavadas, descascadas e distribuídas uniformemente na instalação de secagem permitindo a circulação de ar de forma mais homogênea possível.

II.1.2. Determinação da humidade

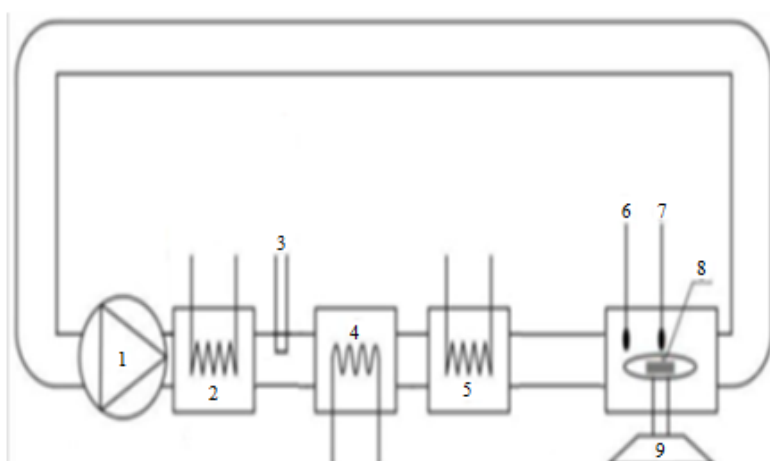
Antes de cada ensaio, para a determinação da humidade inicial, foram retirados pequenos pedaços de pera ou maçã frescas pertencentes ao mesmo lote a ser secado e pesado. De seguida foram colocados numa estufa a $105\pm 1^\circ\text{C}$ durante 12 horas (AOAC, 1998). Após esse período, transferiu-se as amostras para um excicador até arrefecerem e serem pesadas. Repetiu-se a secagem na estufa, arrefecimento e pesagem até a massa pesada atingir o valor constante. Através da massa inicial e final obtida da amostra fresca foi possível determinar a humidade inicial, bem como a humidade final da amostra seca no ensaio realizado no secador, recorrendo ao mesmo procedimento utilizado para determinação da humidade inicial. Todos os ensaios foram realizados em triplicado.

II.1.3. Instalação e controlo do processo

Os diversos ensaios de secagem foram feitos numa instalação de secagem presente no laboratório de termofluidos do Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade de Aveiro (Figura 6). Este aparelho permite uma secagem com convecção forçada de ar, através de um túnel de secagem. O túnel de secagem possui componentes para recircular o ar, aquecer e arrefecer, humidificar e desumidificar o ar de secagem. O equipamento incorpora ainda uma balança (célula de carga) (Figura 7).



Figura 6: Instalação de secagem presente no laboratório de Termofluidos do Departamento de Engenharia Mecânica.



Legenda:

- 1 – Ventilador centrífugo
- 2 – Resistências elétricas de 1KW
- 3 – Humidificador
- 4 – Arrefecedor/Desumidificador
- 5 – Resistências elétricas de 0,5KW
- 6 – Transmissor de velocidade
- 7 – Termohigrómetro
- 8 – Amostra a secar
- 9 – Balança (célula de carga)

Figura 7: Esquema de funcionamento do secador (Boeri *et al.*, 2011).

Devido ao sistema de controlo e aquisição de dados instalados no túnel foi possível controlar os parâmetros de secagem, massa e temperatura da amostra e, ainda, armazenar os registos obtidos desses mesmos dados ao longo do processo. O *software* instalado permitiu programar vários ensaios de secagem. Para cada ensaio foi definido a sua duração, temperatura, humidade, velocidade de ar de secagem e o intervalo de tempo para aquisição dos dados (20 minutos). Seleccionadas e estabilizadas as condições pretendidas foram inseridas várias peças de fruta, inclusive a amostra sobre a balança para aquisição contínua de massa, bem como a introdução de um termopar no interior do fruto. Os ensaios terminaram quando o valor da massa foi constante ou com variação desprezável, após um certo período de tempo.

II.1.4. Tratamento dos dados obtidos

Após cada ensaio procedeu-se à execução de um ficheiro que transformou os dados recebidos, durante a experiência, num ficheiro denominado “Resultados”. Foi deste ficheiro que se extraiu os valores para os resultados experimentais. A Tabela 1 é um exemplo dos valores extraídos do programa para um ensaio realizado a 60°C, 10g H₂O/kg de ar seco, 0,5 m/s.

Tabela 1: Exemplo do registo dos valores extraídos de tempo, massa, temperatura da amostra, humidade absoluta e relativa, temperatura do secador e velocidade.

Tempo (s)	Massa amostra (kg)	Temperatura amostra (°C)	H. Absoluta (g H ₂ O/kg ar)	H. Relativa (%)	Temperatura secador (°C)	Velocidade (m/s)
0	0,06735	21,00000	10,00000	8,00000	60,00000	0,50000
1200	0,06540	26,89165	11,43832	7,93148	60,02825	0,29941
2400	0,06404	29,28412	10,85794	7,68467	60,04453	0,51245
3600	0,06293	30,26062	10,79028	7,63021	60,04767	0,66975
4800	0,06148	31,22115	11,82647	8,43904	60,05782	0,72968
6000	0,06021	32,16586	10,49513	7,58302	58,76556	0,51336
7200	0,05855	32,84015	11,88114	9,59463	57,69392	0,31050
8400	0,05706	33,54661	11,64937	8,51881	59,56008	0,26052
9600	0,05585	34,13583	10,36709	7,28349	60,08338	0,35994
10800	0,05471	34,83219	11,64388	8,29352	60,06351	0,59397
...

Reunidos os dados experimentais procedeu-se à construção: das curvas de secagem que relacionam a massa e o teor de humidade (base húmida) da amostra em função do tempo;

da taxa de secagem em função do tempo; e do teor de humidade (base húmida) da amostra. Para uma melhor interpretação dos vários ensaios foi necessário calcular a taxa de secagem e a humidade das amostras de fruta e adimensionar a massa e a humidade, através das Equações 1, 2, 3 e 4 em cada instante do processo de secagem.

$$\widehat{m}_i = \frac{m_i - m_{final}}{m_{inicial} - m_{final}} \quad \text{Eq. 1}$$

$$H_i = \frac{H_{final} - H_{inicial}}{m_{final} - m_{inicial}} \times (m_i - m_{inicial}) + H_{inicial} \quad \text{Eq. 2}$$

$$\widehat{H}_i = \frac{H_i - H_{final}}{H_{inicial} - H_{final}} \quad \text{Eq. 3}$$

$$\text{Taxa}_{\text{secagem } i} = \frac{m_{i-1} - m_i}{t_{i-1} - t_i} = \frac{m_{\text{removida } i}}{\Delta t} \quad \text{Eq. 4}$$

II.1.5. Metodologia aplicada para os ensaios de secagem

Para uma melhor compreensão da cinética e da influência dos parâmetros de secagem (temperatura, velocidade e humidade) optou-se por aplicar o método Taguchi. Este método, comumente utilizado na área de investigação em engenharia, tem o objetivo de otimizar os níveis dos fatores de controlo e a melhoria da qualidade do produto final, através da análise estatística dos resultados experimentais. Isto é conseguido através da combinação dos parâmetros de controlo do processo (Institute, 1987; Moita, 2007). Os fatores de controlo são: a temperatura, a humidade e a velocidade do ar. Na Tabela 2 encontram-se os fatores e respetivos níveis utilizados para este trabalho.

Tabela 2: Registo dos fatores de controlo e níveis para implementação do método de Taguchi.

		Fatores		
		Temperatura	Humidade	Velocidade
		(°C)	(g H ₂ O/kg ar)	(m/s)
Níveis	1	40	10	0,5
	2	50	15	1,5
	3	60	25	3

Caso fosse aplicado o método fatorial obter-se-iam 27 combinações (27 ensaios). No entanto, o método Taguchi permitiu limitar o número de ensaios utilizados no método fatorial, pois fracionou através de matrizes ortogonais. Foi possível reduzir o número de ensaios para 9, onde cada fator tem de utilizar cada nível o mesmo número de vezes. Na Tabela 3 representa-se os 9 ensaios selecionados pelo método Taguchi.

Tabela 3: Registo dos ensaios e das respetivas condições de secagem utilizadas pelo método Taguchi.

Ensaio	Temperatura (°C)	Humidade (g H₂O/kg ar)	Velocidade (m/s)
1	40	25	0,5
2	40	10	1,5
3	40	15	3
4	50	15	0,5
5	50	25	1,5
6	50	10	3
7	60	10	0,5
8	60	15	1,5
9	60	25	3

Depois da execução dos ensaios selecionados pelo método fatorial fraccionado. Taguchi sugeriu uma análise estatística dos resultados, através da ANOVA, para aferir o grau de influência de cada fator de controlo num determinado resultado(s) final (tempo de secagem, qualidade, custo, etc) . A percentagem de contribuição é calculada pela razão entre a soma dos quadrados de um determinado fator e a soma dos quadrados total. Para uma melhor perceção, nos anexos A3 foi descrito o procedimento para os cálculo acima mencionado.

Entendidos os parâmetros de controlo que envolvem o processo de secagem procedeu-se a um novo conjunto de ensaios. Os ensaios foram realizados com uma temperatura de secagem de 30°C, 40°C, 50°C e 60°C, mas com a humidade absoluta e a velocidade fixas para todas as experiências.

II.2. Determinação da atividade da água (a_w)

Para a determinação da atividade da água, a_w , as amostras de fruta seca, em diferentes condições de secagem, foram cortadas em pequenos bocados (cerca de 7g) e colocados em tubos (4cm de diâmetro x 1,5cm de altura). De seguida, mediu-se com um higrómetro (Novasina, AG 8853 Lachen, Switzerland) a atividade da água ao fim de 40 minutos de estabilização da atmosfera envolvente. A temperatura selecionada para o equipamento foi de 25°C e os tubos estavam selados de modo a que não houvesse trocas com a atmosfera exterior.

II.3. Análise da textura

As propriedades de textura da fruta seca foram estudadas pelo método de Análise do Perfil de Textura (TPA), utilizando um Texturómetro (Stable Micro Systems TA-HDi, UK) adaptado com uma sonda circular de penetração (diâmetro de 2mm). Este equipamento possuiu interfaces de ligação para a aquisição e análise de dados, através do programa Texture Exceed, versão 1.0. Os parâmetros de aquisição para os testes realizados foram os seguintes: velocidade da sonda (1mm/s); distância (10mm); tempo de ciclo completo (45s); célula de carga (5kg) e taxa de aquisição (25pps).

A metodologia utilizada para estudar a textura das frutas secas, por diferentes tratamentos de secagem, consistiu na seleção de 6 peças de frutas para cada condição de secagem. Para cada peça de fruta foram realizadas 7 medições (perfurações) na zona exterior, pois a zona central é bastante rija. Importa referir que, depois de ajustada a posição de perfuração para cada um dos pontos definidos, teve-se o cuidado de apoiar as peças de fruta, de modo a evitar deslizamentos das mesmas na superfície do equipamento.

O teste TPA consistiu em dois ciclos, em que a força aplicada vai sendo registada em função do tempo (Figura 8), através do software instalado.

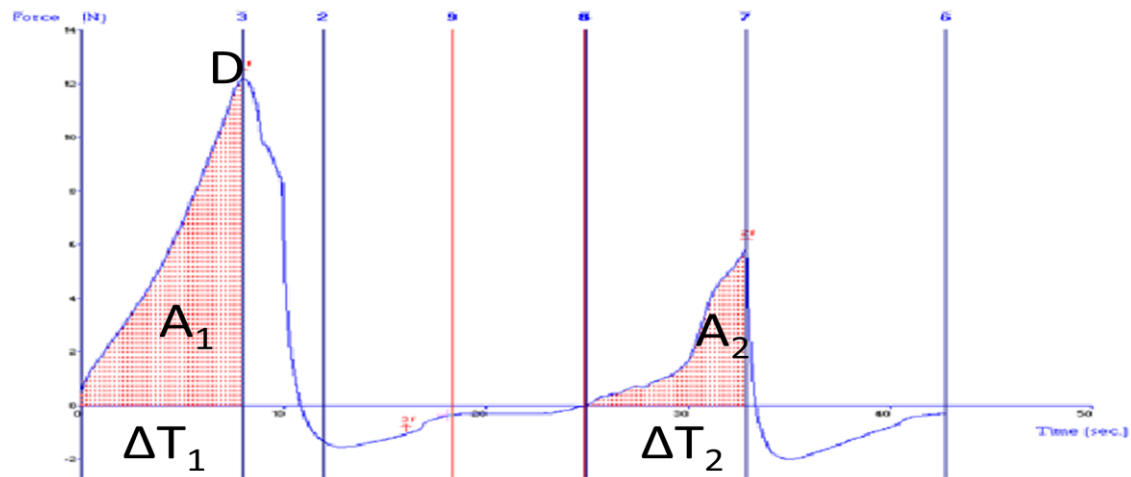


Figura 8: Representação gráfica dos parâmetros de compressão através da curva de TPA.

Obtido o perfil TPA determinou-se os seguintes atributos de textura: dureza, coesividade, elasticidade e mastigabilidade. A dureza (D), expressa em Newton, é definida como a força máxima aplicada no primeiro ciclo. A coesividade (C) é representada pela razão entre as áreas A_2/A_1 . A elasticidade (E) é representada pela razão entre as distâncias percorridas pela sonda até se atingir a força máxima em cada uma das curvas ($\Delta T_2/\Delta T_1$). E a mastigabilidade (M) é quantificada pelo produto da dureza, coesividade e elasticidade ($M=D \times C \times E$) (Ferreira *et al.*, 2008; Nunes *et al.*, 2009).

II.4. Análise sensorial

A análise sensorial foi efetuada a peras secas com diferentes condições de secagem. A prova de ordenação foi o método escolhido, uma vez que o objetivo era a comparação de 9 amostras referentes a um atributo. Aos 10 provadores foi solicitado que ordenassem as amostras codificadas, de acordo com a intensidade de um determinado atributo: cor, mastigabilidade e sabor.

II.5. Escurecimento enzimático pela polifenoloxidase (PPO)

O escurecimento enzimático da fruta, mediado pela polifenoloxidase (PPO), foi quantificado pela atividade da PPO por diferentes tratamentos de secagem e de alta pressão.

A extração consistiu na homogeneização de 25g de fruta, com 8,3ml de 0,2M de tampão fosfato de sódio (pH 6,5) e 4% (m/m) Polivinilpirrolidona (PVP), utilizando um Ultraturrax (Janke & Kunkel/IKA T25), seguido de agitação a 4°C, durante 1 hora. O homogeneizado foi filtrado através de várias camadas de tecido de algodão e, posteriormente, centrifugado a 10000g's, durante 20 minutos, a 4°C. O sobrenadante (designado por extrato enzimático) foi recolhido, congelado em nitrogénio líquido e armazenado a -23°C, até à quantificação enzimática (Jang *et al.*, 2011; Castro *et al.*, 2008).

Para quantificar a atividade da polifenoloxidase (PPO) recorreu-se a um espectrofotómetro UV/Visível (Elmer, modelo lambda 35) utilizando o método descrito por Whitaker *et al.* (2003), mas com algumas alterações. Uma solução de catecol (Fluka) 0,01M em tampão fosfato 0,1M, a pH 6,5, foi utilizada como substrato. A mistura reacional consistiu em 1000µL de substrato, a 37°C, e 100µL de extrato enzimático, durante 2 minutos. A atividade da PPO calculou-se a partir do declive da zona linear da curva, que relaciona absorvência com o tempo, e foi expressa como $\Delta\text{Abs}_{411\text{nm}}/\text{min}/25\text{g}$ de peso seco.

Ao longo do processo de secagem da pera foi determinada a atividade da PPO para as amostras secas em intervalos definidos de 3, 6 e 18 horas de processamento.

Quanto aos tratamentos por alta pressão foram feitos num equipamento da Universidade de Aveiro (Unipress, Modelo U33, Polónia). Este equipamento tem capacidade de atingir pressões de 700MPa e permite controlo de temperatura. Possui um vaso de pressurização com capacidade para 100mL, tendo 35 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Antes de colocar as amostras no vaso, os pedaços de pera (25g) foram acondicionados em sacos de plástico e colocados em vácuo para remover o ar. As peras foram submetidas a 50MPa, 100MPa, 200MPa e 400MPa, durante 5 minutos.

III. Resultados e discussão

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos no trabalho experimental, bem como a sua discussão. O trabalho pode ser decomposto em duas partes distintas. A primeira parte aborda o processo de secagem, no que diz respeito à influência dos parâmetros de controlo na cinética, bem como na qualidade e segurança do produto final. A segunda parte consiste num estudo detalhado do efeito da temperatura de secagem na cinética, na atividade da água, na textura e no escurecimento da fruta a secar. Esta última parte compreendeu, ainda, uma pequena análise do efeito da alta pressão como pré-tratamento de secagem.

III.1. Estudo do processo de secagem

Como referido na metodologia, para o estudo do processo de secagem realizou-se um conjunto de 9 ensaios selecionados pelo método Taguchi. Numa primeira fase apresenta-se as curvas de cinética da secagem destes ensaios, para compreender o comportamento dos mesmos. Posteriormente aplicou-se o método Taguchi para avaliar a influência dos parâmetros de controlo no tempo de operação. Por fim, determinou-se a textura e a atividade da água e realizou-se as provas sensoriais das amostras relativas a estes ensaios, de modo a relacionar com os parâmetros de controlo aplicados.

III.1.1. Cinética da secagem

Para a análise dos 9 ensaios realizados apresentam-se na Figura 9 as curvas de secagem que relacionam a humidade do alimento, em base húmida, com o tempo. Importa referir que o comportamento da humidade da pera foi semelhante ao da evolução da massa, como seria expectável. A diminuição de massa da pera ao longo da secagem é sobretudo devida à perda de água do alimento.

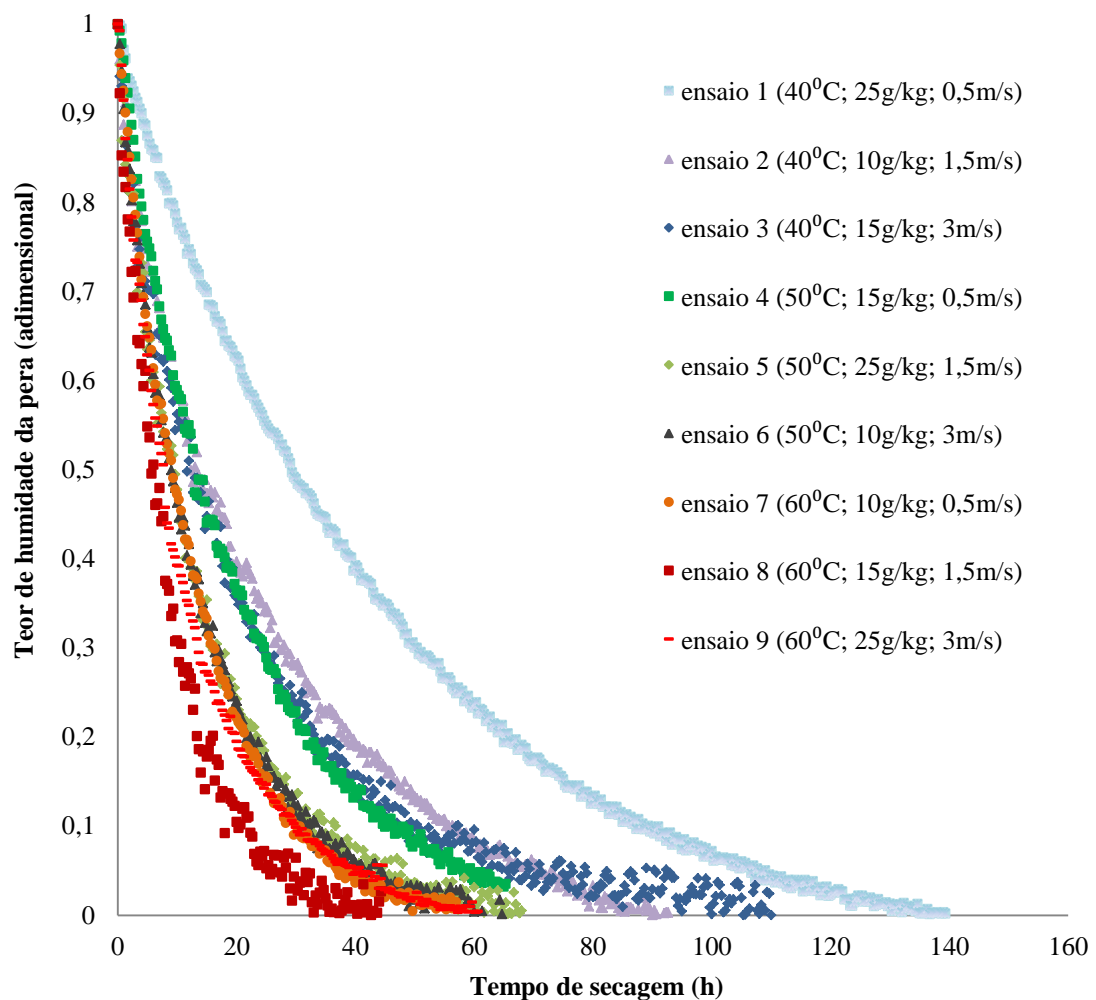


Figura 9: Representação gráfica da humidade (adimensional) da Pera Rocha em função do tempo de secagem para os nove ensaios.

No início da secagem, nos nove ensaios realizados, o teor de humidade da pera baixa rapidamente, devido à vaporização da água na superfície do alimento provocada pela transferência de calor do ar para o produto. Como comprovado pelas elevadas taxas de secagem atingidas no início das experiências.

Em todos os ensaios realizados não foi possível detetar o período de velocidade constante, uma vez que a taxa de secagem não apresentou valores constantes ao longo do processo, tal como nos estudos desenvolvidos pelos autores Lahsasni *et al.*, 2004 e Schultz *et al.*, 2007. A perda de humidade à superfície do fruto foi sempre superior em relação à transferência do interior da pera até à sua superfície.

Com o decorrer da secagem verificou-se uma diminuição da taxa de secagem ou uma perda da humidade menos acentuada nos ensaios delineados. A presença de água à superfície da pera é cada vez menor e a temperatura do produto aumenta até à temperatura do ar do secador. Nesta fase, a transferência de calor não é compensada pela transferência de massa. Portanto, a velocidade de secagem depende do mecanismo pelo qual a água no interior do sólido se move para a superfície. Os ensaios terminaram quando a taxa de secagem foi praticamente nula.

Comparando as curvas de secagem verifica-se que exibem comportamentos semelhantes com uma maior perda da humidade na fase inicial e, posteriormente, um abrandamento dessa mesma perda de água até à sua estabilização. À exceção do ensaio 1, realizado a condições de secagem muito suaves de temperatura, humidade e velocidade, que refletiu uma perda de humidade muito morosa.

Concluiu-se que os ensaios realizados a uma temperatura de secagem superior a 60°C apresentaram tempos de secagem mais curtos e taxas de secagem mais elevadas na fase inicial. Enquanto os ensaios efetuados à temperatura de 40°C exibiram tempos de secagem muito superiores aos restantes. À temperatura do ar de secagem de 50°C os ensaios manifestaram tempos de secagem intermédios entre as outras temperaturas usadas, mas mais próximos da temperatura de 60°C.

A aplicação do método Taguchi, e posteriormente através da análise *ANOVA*, foi possível estimar a influência dos três parâmetros de controlo no tempo total de secagem e na textura do fruto. A Figura 10 evidencia a percentagem de influência de cada parâmetro no tempo de secagem.

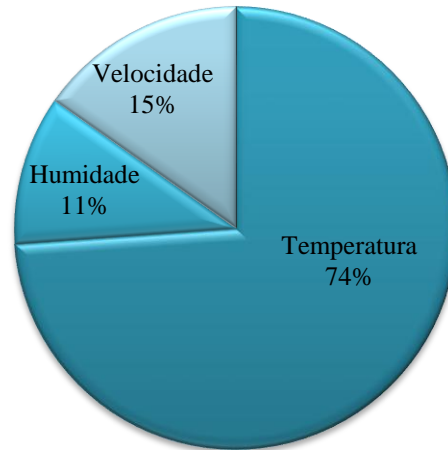


Figura 10: Representação gráfica da influência das condições do ar de secagem no tempo de operação.

A preponderância da temperatura do ar no tempo de secagem foi evidente com uma percentagem de 74%, em relação à velocidade e humidade do ar com 15% e 11%, respetivamente.

Embora a influência da temperatura seja inquestionável, pois a transferência de calor é potenciada pelo aumento do gradiente de temperatura entre o ar e a pera, a aplicação da velocidade de ar elevada e uma humidade do ar baixa também reduz o tempo de secagem. Isto porque a velocidade do ar de secagem facilita a transferência de calor por convecção, enquanto a baixa humidade do ar diminui a pressão parcial de vapor de água no ar, favorecendo a transferência de massa (Lahsasni *et al.*, 2004; Valentas *et al.*, 1997).

A determinação da influência destes parâmetros de secagem tornou-se revelante para otimizar o processo no que diz respeito ao tempo de operação, bem como diminuir custos de produção, referentes aos consumos de ventilação e humidificação.

III.1.2. Análise da textura

A textura é reconhecida como um dos mais importantes atributos de qualidade em frutas. A redução do conteúdo de água na fruta, durante a secagem, provoca o encolhimento do alimento e alterações nas propriedades mecânicas. Consoante as condições dos tratamentos utilizados as alterações da textura foram determinadas.

No sentido de avaliar a qualidade dos frutos secos resultantes dos nove ensaios procedeu-se à análise dos parâmetros de textura, através do método de TPA. Na Tabela 4 apresenta-se os resultados dos parâmetros de textura estabelecidos: dureza, coesividade, elasticidade e mastigabilidade.

Tabela 4: Registo dos valores obtidos de dureza, coesividade, elasticidade e mastigabilidade para os 9 ensaios de secagem.

Ensaio	Dureza (N)	Coesividade	Elasticidade	Mastigabilidade (N)
1 (40°C; 25g/kg; 0,5m/s)	8,00±1,74 ^d	0,33±0,05 ^d	1,03±0,30 ^d	2,87±1,38 ^{a b c}
2 (40°C; 10g/kg; 1,5m/s)	11,34±3,14 ^a	0,27±0,08 ^{b d}	0,59±0,19 ^a	1,86±1,23 ^{a b}
3 (40°C; 15g/kg; 3m/s)	12,99±4,12 ^{a b}	0,43±0,11 ^c	0,87±0,18 ^b	4,88±2,15 ^d
4 (50°C; 15g/kg; 0,5m/s)	10,86±2,49 ^a	0,40±0,09 ^c	0,90±0,18 ^b	3,99±1,80 ^{c d}
5 (50°C; 25g/kg; 1,5m/s)	12,29±3,04 ^{a b}	0,33±0,11 ^d	0,87±0,21 ^b	3,62±1,89 ^{b c d}
6 (50°C; 10g/kg; 3m/s)	13,02±4,02 ^{a b}	0,17±0,08 ^a	0,36±0,10 ^c	1,07±0,99 ^a
7 (60°C; 10g/kg; 0,5m/s)	17,93±2,90 ^c	0,21±0,06 ^{a b}	0,57±0,14 ^a	2,53±0,86 ^{a b c}
8 (60°C; 15g/kg; 1,5m/s)	14,61±3,63 ^b	0,22±0,06 ^{a b}	0,67±0,25 ^a	2,30±1,31 ^{a b c}
9 (60°C; 25g/kg; 3m/s)	17,29±6,22 ^c	0,41±0,13 ^c	1,06±0,35 ^d	7,90±6,37 ^e

Os valores são uma média (\pm desvio padrão) de várias medições efetuadas. Diferentes letras indicam diferenças significativas ($p < 0,05$).

Para permitir uma melhor visualização do efeito das condições de secagem na textura das peras secas, apresenta-se nas Figuras 11, 12, 13 e 14 os atributos de textura determinados (dureza, coesividade, elasticidade e mastigabilidade) para os nove ensaios realizados.

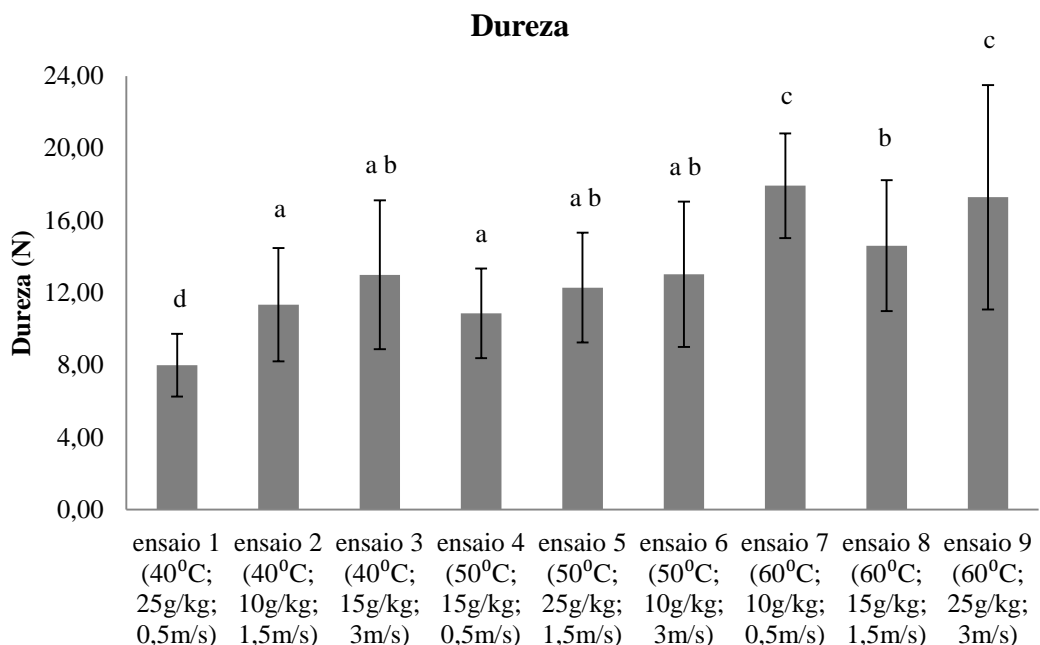


Figura 11: Dureza das peras secas para os nove ensaios realizados. Colunas com a mesma letra não são estatisticamente diferentes ($p < 0,05$).

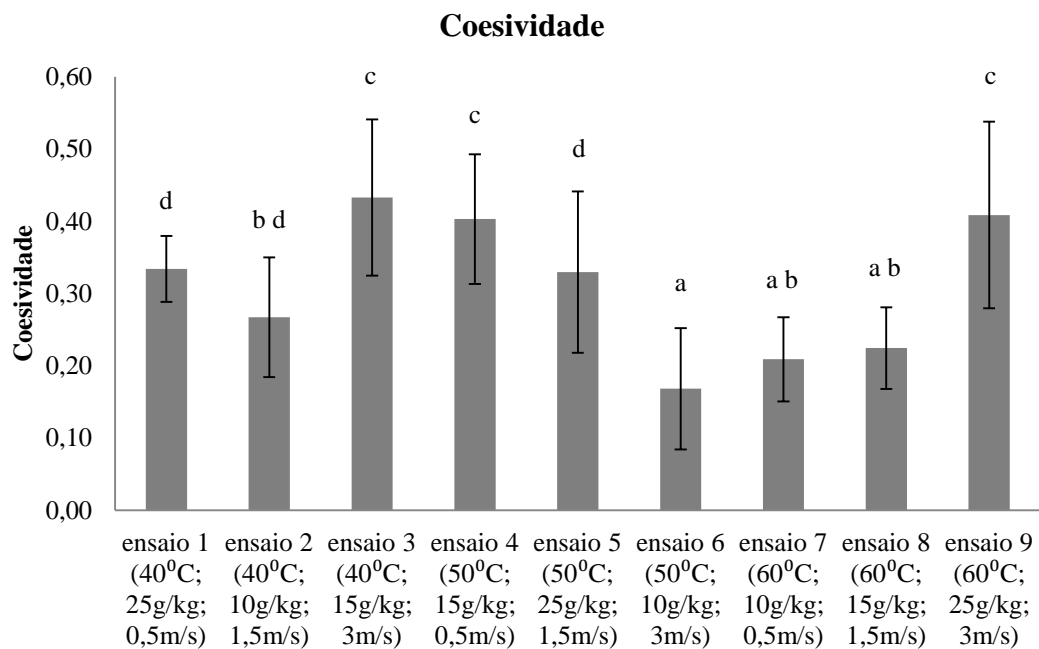


Figura 12: Coesividade das peras secas para os nove ensaios realizados. Colunas com a mesma letra não são estatisticamente diferentes ($p < 0,05$).

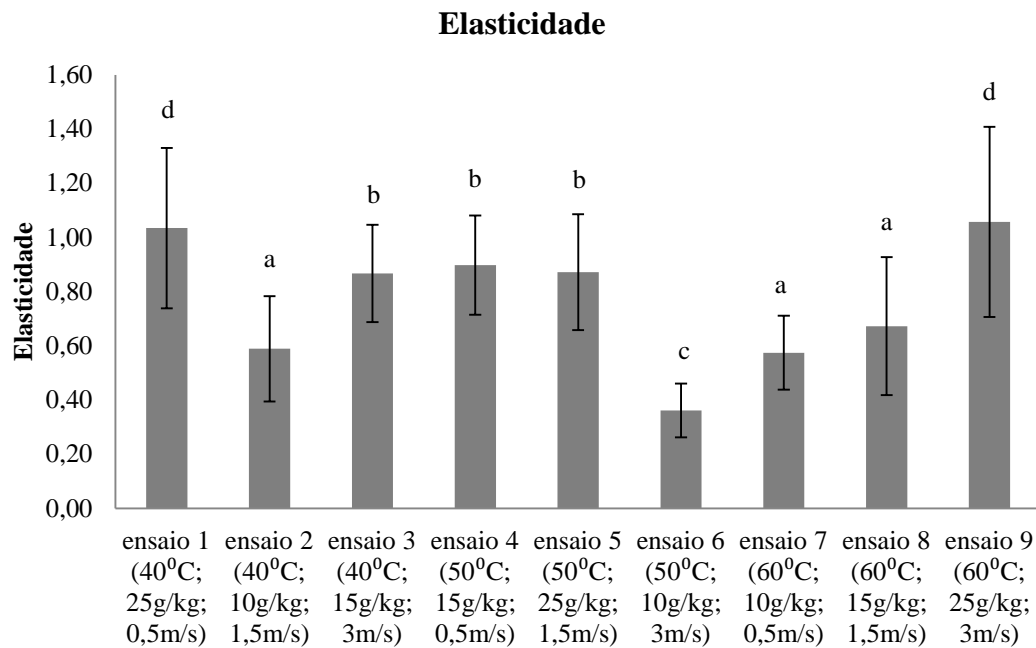


Figura 13: Elasticidade das peras secas para os nove ensaios realizados. Colunas com a mesma letra não são estatisticamente diferentes ($p < 0,05$).

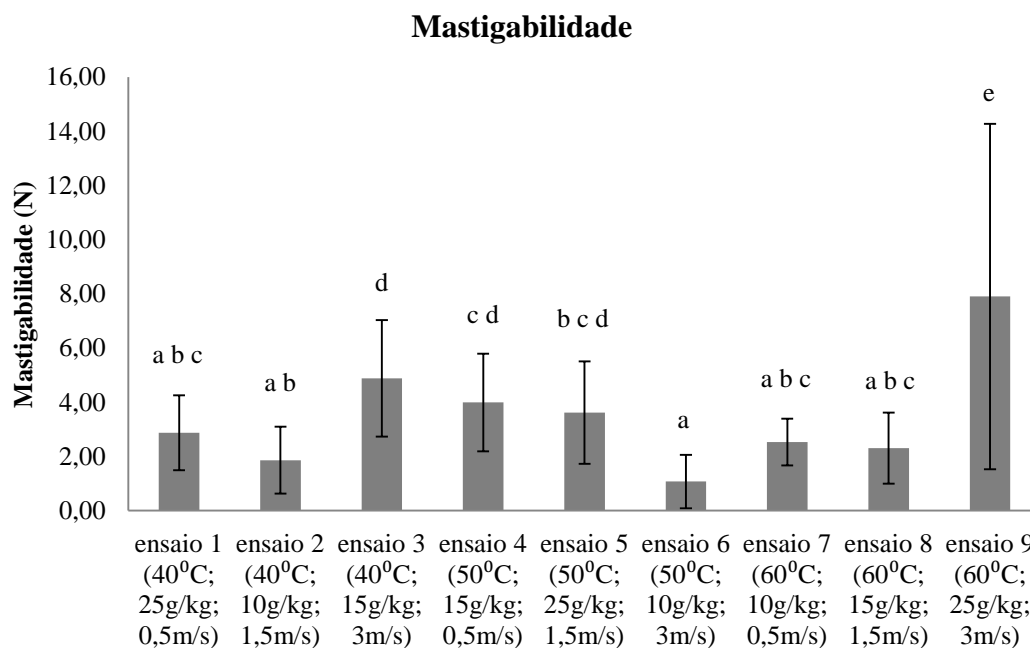


Figura 14: Mastigabilidade das peras secas para os nove ensaios realizados. Colunas com a mesma letra não são estatisticamente diferentes ($p < 0,05$).

A textura, nomeadamente a dureza dos frutos é afetada pelo processo de secagem. A análise estatística permitiu verificar algumas diferenças na dureza das peras secas. Uma diferença assinalável na dureza foram as amostras do ensaio 1 (40°C; 25g/kg; 0,5m/s) por

apresentarem um valor muito inferior (8 N) em comparação aos ensaios 7 (60°C; 10g/kg; 0,5m/s) e 9 (60°C; 25g/kg; 3m/s), com 17,93 N e 17,29 N, respetivamente. Os restantes ensaios mostraram valores intermédios com pequenas diferenças significativas entre eles. A dureza das peras secas no ensaio 8 (60°C; 15g/kg; 1,5m/s) exibiu valores significativamente diferentes dos ensaios 2 (40°C; 10g/kg; 1,5m/s) e 4 (50°C; 15g/kg; 0,5m/s). Foi notória a relação entre a temperatura aplicada e a dureza das peras. Isto deveu-se ao facto das temperaturas elevadas provocarem menor tempo de secagem, o que resultou numa maior rigidez da pera.

A sensação elástica, natural da pera seca, traduz-se numa maior resistência à fratura, possivelmente devido a uma maior capacidade de dissipação de tensões por efeito de uma maior flexibilidade e elasticidade dos tecidos, comparativamente à pera fresca (Ferreira, 2008).

A coesividade das amostras secas foi superior nos ensaios 3 (40°C; 15g/kg; 3m/s), 9 (60°C; 25g/kg; 3m/s) e 4 (50°C; 15g/kg; 0,5m/s), com 0,43, 0,41 e 0,40, respetivamente. Os valores mais baixos foram 0,17, 0,22 e 0,21 para os ensaios 6 (50°C; 10g/kg; 3m/s), 7 (60°C; 10g/kg; 0,5m/s) e 8 (60°C; 15g/kg; 1,5m/s), respetivamente.

As peras secas com maior elasticidade foram as provenientes dos ensaios 9 (60°C; 25g/kg; 3m/s) e 1 (40°C; 25g/kg; 0,5m/s). No entanto, os ensaios 4 (50°C; 15g/kg; 0,5m/s), 3 (40°C; 15g/kg; 3m/s) e 5 (50°C; 25g/kg; 1,5m/s) apresentaram igualmente peras bastante elásticas, quando comparado com as amostras dos restantes ensaios.

Não pareceu existir nenhuma ligação entre a temperatura do ar de secagem com a coesividade e a elasticidade. Porém, existiu uma tendência entre a humidade do ar seleccionada e estes dois atributos de textura da fruta seca. Os ensaios praticados com uma humidade absoluta igual ou superior 15g/kg originaram peras secas com maior coesividade e elasticidade.

O parâmetro da mastigabilidade apresentou poucas diferenças significativas entre os ensaios, pois este é fortemente influenciado pelos outros parâmetros de textura. Contudo, as amostras dos ensaios 9 e 6 apresentaram valores muito distintos. As amostras do ensaio 9 (60°C; 25g/kg; 3m/s) apresentaram um valor de 7,9 N, enquanto 1,07 N foi o valor obtido para o ensaio 6 (50°C; 10g/kg; 3m/s). O motivo para esta diferença residiu nos elevados valores de dureza, coesividade e elasticidade.

Torna-se difícil identificar qual o atributo de textura mais influenciável pelas condições de secagem impostas. Assim, optou-se por eleger a dureza das peras secas como o principal fator de qualidade ao nível da textura. Definiu-se que uma qualidade superior do produto seria a obtenção de peras menos duras, uma vez que a aceitabilidade do consumidor seria favorável. A Figura 15 determina o efeito de cada parâmetro de secagem na dureza das peras secas obtidas.

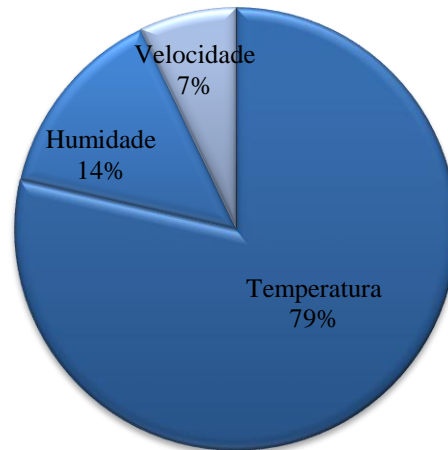


Figura 15: Representação gráfica da influência das condições do ar de secagem na dureza das peras secas.

Ao aplicar o método Taguchi determinou-se que a temperatura tem uma influência de 79% na dureza das peras secas, enquanto a velocidade e a humidade tem apenas 7% e 14%, respetivamente.

A velocidade de secagem é fortemente influenciada pela temperatura de secagem. Deste modo, o uso de temperaturas superiores provoca uma perda rápida de água na pera. O resultado desta perda de água foi o encolhimento mais acelerado durante o processo. Este encolhimento tem impacto nas propriedades físicas, nomeadamente na textura da pera seca (Chen e Mujumdar, 2008). A utilização de temperaturas de secagem mais elevadas promovem a produção de peras mais duras.

III.1.3. Determinação da atividade da água (a_w)

É fundamental a produção de fruta seca com elevada segurança alimentar. Os objetivos da secagem são prolongar o tempo de vida útil sem necessidade de refrigeração durante o transporte e armazenamento, através da redução da atividade da água para um nível que inibe o crescimento de microrganismos patogénicos.

Paralelamente ao estudo da qualidade a nível de textura das peras secas produzidas neste conjunto de ensaios foi determinada a atividade da água. A Tabela 5 mostra os valores da atividade da água para os respetivos tratamentos utilizados.

Tabela 5: Registo dos valores da atividade da água para os nove ensaios realizados.

Ensaio	Atividade da água (a_w)
1 (40°C; 25g/kg; 0,5m/s)	0,581±0,007
2 (40°C; 10g/kg; 1,5m/s)	0,598±0,002
3 (40°C; 15g/kg; 3m/s)	0,524±0,005
4 (50°C; 15g/kg; 0,5m/s)	0,558±0,004
5 (50°C; 25g/kg; 1,5m/s)	0,482±0,004
6 (50°C; 10g/kg; 3m/s)	0,512±0,006
7 (60°C; 10g/kg; 0,5m/s)	0,517±0,006
8 (60°C; 15g/kg; 1,5m/s)	0,525±0,006
9 (60°C; 25g/kg; 3m/s)	0,482±0,005

Os valores são uma média (\pm desvio padrão) de várias medições efetuadas.

A atividade da água diminui com a remoção do conteúdo de humidade na secagem das frutas. Após a análise da Tabela 5 pôde-se assegurar que para todas as amostras

processadas é improvável o crescimento microbiano, pois a maioria dos fungos não vai crescer abaixo do valor de a_w de 0,6 (Rahman, 2007). Os resultados de a_w (compreendidos entre 0,482 e 0,598) foram satisfatórios, conferindo prevenção ao desenvolvimento de microrganismos e de reações enzimáticas indesejáveis.

Contudo, a segurança alimentar deste tipo de produtos não é assegurada apenas pela inibição do crescimento microbiano, pois os microrganismos não são necessariamente eliminados (só foram criadas condições para evitar o seu crescimento). Este facto deve ter sido em conta durante o processamento, embalagem e armazenamento, bem como aos fatores extrínsecos que afetam o desenvolvimento microbiano, como a temperatura, a humidade relativa e o oxigénio.

Apesar das amostras secas manifestaram um nível de atividade da água baixo (inferior a 0,6) que permite um armazenamento seguro, o embalagem destes produtos deve ser resistente à humidade e capaz de impedir a transferência de oxigénio, evitando a reidratação e a oxidação, com formação de sabores desagradáveis (Jangam *et al.*, 2010).

III.1.4. Análise sensorial

É imprescindível o desenvolvimento e fabrico de produtos que sejam do agrado do consumidor. O conhecimento das características requeridas por estes é uma das aplicações mais importantes no desenvolvimento de novos produtos.

Nas Figuras 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 e 24 encontra-se visível a aparência de algumas réplicas das amostras (peras secas) resultantes nos nove ensaios efetuados.



Figura 16: Pera Rocha seca pelas condições do ensaio 1.



Figura 17: Pera Rocha seca pelas condições do ensaio 2.



Figura 18: Pera Rocha seca pelas condições do ensaio 3.



Figura 19: Pera Rocha seca pelas condições do ensaio 4.



Figura 20: Pera Rocha seca pelas condições do ensaio 5.



Figura 21: Pera Rocha seca pelas condições do ensaio 6.



Figura 22: Pera Rocha seca pelas condições do ensaio 7.



Figura 23: Pera Rocha seca pelas condições do ensaio 8.



Figura 24: Pera Rocha seca pelas condições do ensaio 9.

As duas modificações macroscópicas mais distintivas foram o encolhimento e o escurecimento.

O encolhimento foi um fenómeno observado durante a secagem da Pera Rocha e da Maçã Malápio da Serra. Este fenómeno está associado ao endurecimento. A perda de água durante a secagem pode causar rigidez, estragos e rutura das paredes celulares ou até mesmo o colapso do tecido celular (Vega-Gálvez *et al.*, 2012; Troncoso e Pedreschi, 2007). Embora o encolhimento e endurecimento seja uma modificação apreciada, pois a fruta seca é conhecida como mais difícil de mastigar, as diferentes condições de secagem determinam estas modificações. Os ensaios com uma secagem mais rápida provocaram rachaduras e formação de uma crosta à superfície, resultando um produto final mais rígido. Enquanto velocidades de secagem lentas resultaram em produtos mais uniformes e densos.

Para além do aspeto, a cor é provavelmente o atributo mais importante ao nível da aceitação do consumidor. A secagem da fruta promove o seu escurecimento. As reações Maillard, o escurecimento enzimático e os pigmentos de cor desempenham importantes mudanças na cor do produto durante a secagem (Jangam *et al.*, 2010). As condições de secagem utilizadas degradaram a cor original do produto, porém a exposição a temperaturas mais elevadas e períodos de tempo mais curtos preservaram mais eficazmente a cor.

Atendendo às qualidades organoléticas (cor, mastigabilidade e sabor) das peras secas obtidas, realizou-se uma prova de análise de sensorial com o intuito de relacionar as diferentes condições de secagem aplicadas. Quanto maior pontuação, maior intensidade do atributo. A cor, a mastigabilidade e o sabor mais intensos significam maior escurecimento, maior dificuldade de mastigar e melhor sabor, respetivamente.

Os resultados da prova encontram-se nas Figuras 25, 26 e 27 e ilustram a intensidade de cada atributo das amostras, relativas aos ensaios realizados.

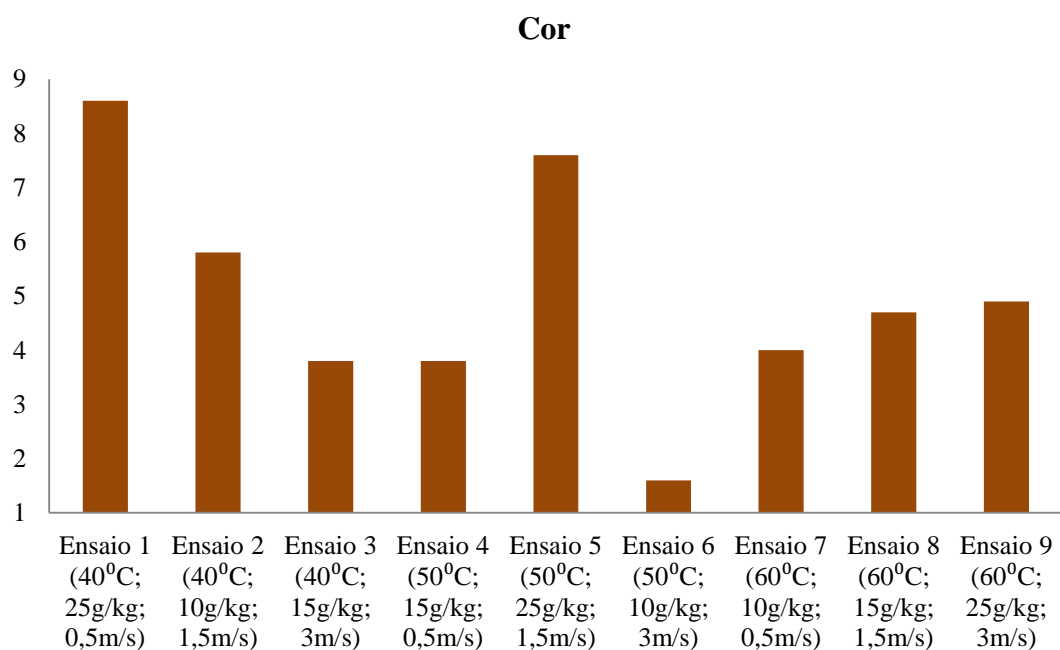


Figura 25: Resultado da análise sensorial relativa à intensidade da cor dos nove ensaios.

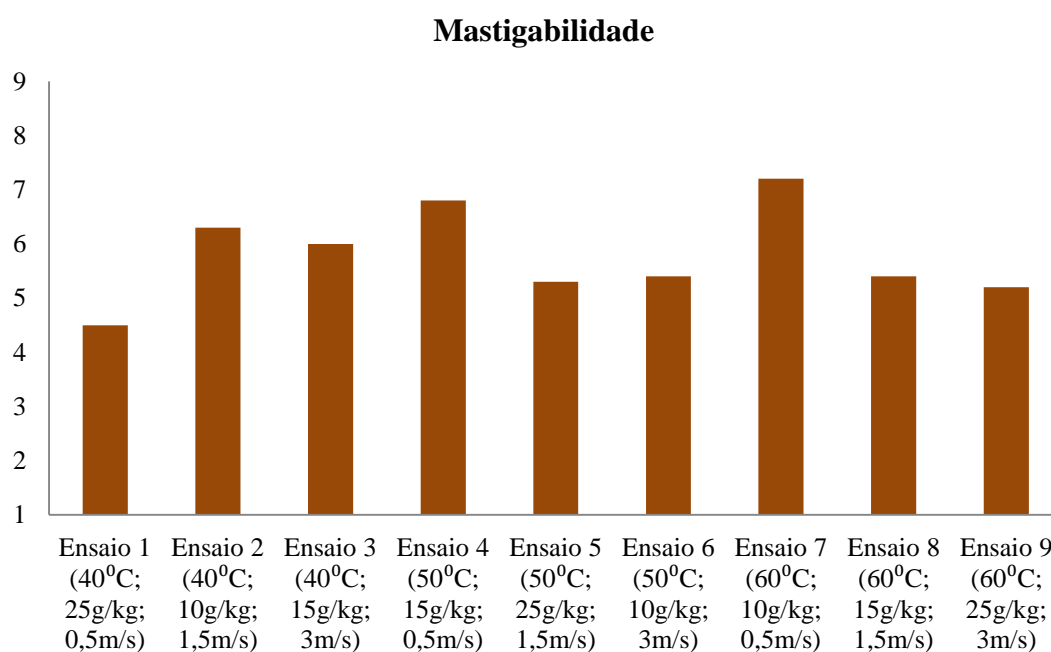


Figura 26: Resultado da análise sensorial relativa à intensidade da mastigabilidade dos nove ensaios.

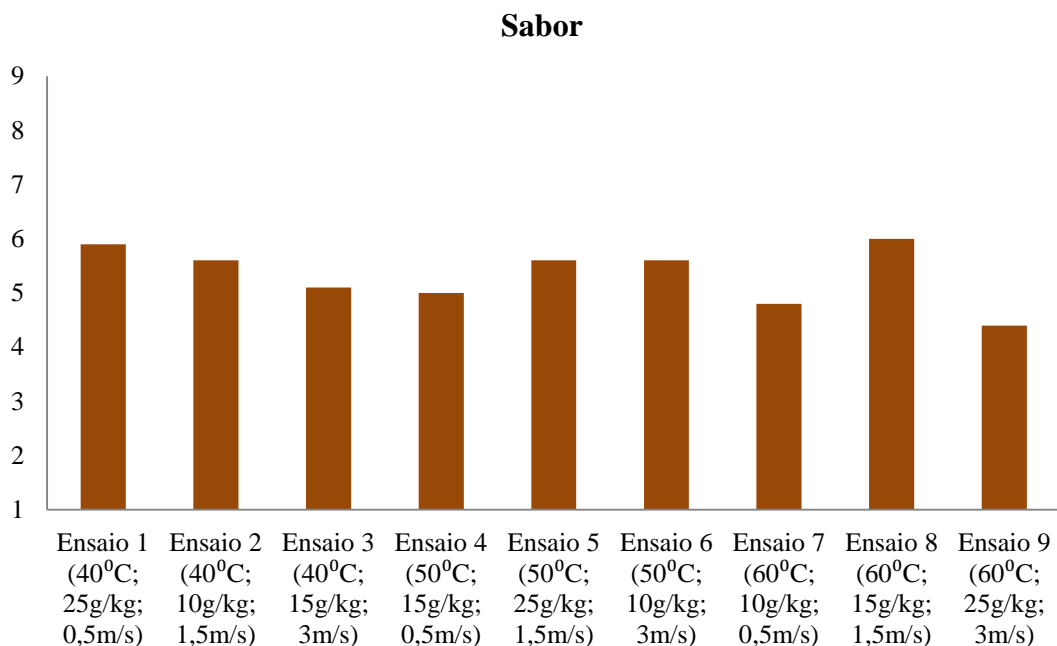


Figura 27: Resultado da análise sensorial relativa à intensidade do sabor dos nove ensaios.

Ao nível da coloração das peras secas foi de realçar o ensaio 1 (40°C; 25g/kg; 0,5m/s) com uma cor muito mais intensa (cor castanho avermelhado). Os provadores comentaram a cor adquirida da pera como a cor mais apelativa relativamente às restantes. As amostras dos ensaios 5 (50°C; 25g/kg; 1,5m/s) e 2 (40°C; 10g/kg; 1,5m/s) apresentaram também uma cor mais escura. As peras do ensaio 6 (50°C; 10g/kg; 3m/s) exibiram uma cor bastante mais clara que as restantes.

No que respeita à mastigabilidade observaram-se ligeiras diferenças entre as amostras analisadas. As amostras mais difíceis de mastigar foram as dos ensaios 7 (60°C; 10g/kg; 0,5m/s), 4 (50°C; 15g/kg; 0,5m/s), 2 (40°C; 10g/kg; 1,5m/s) e 3 (40°C; 15g/kg; 3m/s). O painel de provadores identificou as peras do ensaio 1 (40°C; 25g/kg; 0,5m/s), como as mais fáceis de mastigar. Comparando os testes de TPA com a análise sensorial verificou-se uma ligeira concordância nos ensaios 3 e 4 com valores mais elevados para a mastigabilidade. O ensaio 7 demonstrou o valor mais alto por parte dos provadores. Este facto revela a dificuldade, para um painel de provadores pouco experimentado, distinguir sensorialmente a dureza da mastigabilidade, pois a dureza neste ensaio foi alta a partir do teste TPA. O mesmo ocorreu para o ensaio 1, identificadas como as mais fáceis de mastigar, o teste de TPA determinou-as com valores de dureza mais baixos.

Os provadores não detetaram diferenças assinaláveis no sabor das amostras. Contudo, as peras dos ensaios 7 (60°C; 10g/kg; 0,5m/s) e 9 (60°C; 25g/kg; 3m/s) demonstraram pouco aceitação relativamente a este atributo. Existiu uma relação com teste de TPA ao nível da dureza com o sabor destes ensaios. Pois, os ensaios 7 e 9 apresentaram valores elevados de dureza que podem ter dificultado a perceção do sabor para estas amostras.

Em conclusão, os provadores identificaram algumas diferenças nas amostras. No entanto, globalmente, estes apreciaram sensorialmente as peras secas, considerando que o produto poderá ter valor comercial.

A intensidade da cor (escurecimento) das peras secas revelou-se fundamental na qualidade sensorial deste tipo de produto, uma vez que apenas ligeiras diferenças na mastigabilidade e sabor foram identificadas. Importa mencionar a elevada aceitação das peras produzidas no ensaio 1 (40°C; 25g/kg; 0,5m/s) em todos os atributos sensoriais por este conjunto de provadores.

III.2. Efeito da temperatura de secagem no processo e no produto

Esta fase permitiu avaliar o efeito da temperatura na cinética de secagem da pera e da maçã. Foi igualmente possível verificar alterações da atividade da água e da textura, como consequência da temperatura aplicada. Por fim, estudou-se o escurecimento enzimático da fruta, através da monitorização da atividade da polifenoloxidase da pera, durante o processo de secagem, e investigou-se o efeito da alta pressão no escurecimento.

III.2.1. Efeito da temperatura na cinética da secagem

Para uma melhor compreensão da influência da temperatura na cinética realizaram-se quatro ensaios com temperaturas de secagem diferentes (30°C, 40°C, 50°C e 60°C), mantendo-se os parâmetros de velocidade e de humidade do ar de secagem fixos, 3 m/s e 15 g H₂O/kg ar.

As curvas de secagem que relacionam a humidade da pera em função do tempo para os ensaios acima mencionados estão descritas na Figura 28.

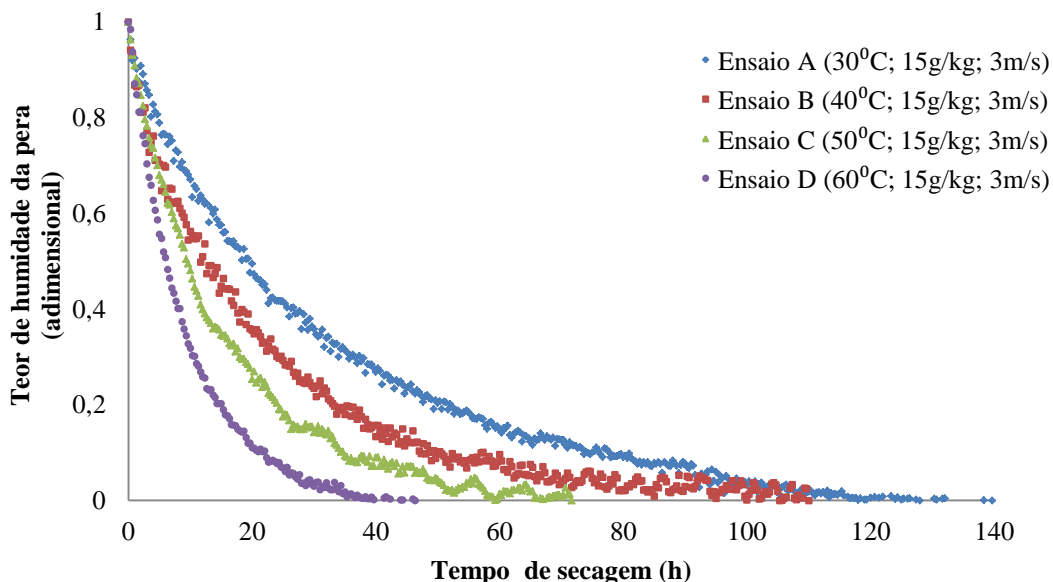


Figura 28: Representação gráfica da humidade (adimensional) da pera em função do tempo de secagem para os quatro ensaios realizados, com temperaturas de secagem diferentes.

Tal como nos nove ensaios anteriores, as curvas de secagem apresentaram um comportamento semelhante através de uma quebra acentuada de humidade na fase inicial. Seguida de um abrandamento até a uma variação de humidade praticamente nula.

O modo como ocorreu a diminuição da humidade da pera é mais ou menos acentuada, consoante a temperatura de secagem usada. A temperaturas superiores foi notória uma diminuição mais abrupta da humidade da pera ao longo da secagem.

Outra diferença assinalável foi o tempo de secagem distinto dos ensaios efetuados. Foram necessárias apenas cerca de 46 horas de secagem para o ensaio com temperatura de 60°C, enquanto para o ensaio a 30°C a secagem demorou aproximadamente 140 horas. Os ensaios referentes a uma temperatura de ar de secagem de 40°C e 50°C tiveram um tempo de operação de 72 e 110 horas, respetivamente.

Em conformidade com estudos realizados anteriores, Goyal *et al.*, 2007, Lahsasni *et al.*, 2004 e Vega-Gálvez *et al.*, 2012, concluiu-se que uma temperatura de ar de secagem maior resulta numa taxa de secagem maior e, consequentemente, uma diminuição da humidade mais acentuada. Isto deve-se ao aumento da taxa de calor fornecido e à aceleração do fluxo de água no interior da pera.

As curvas que relacionam a taxa de secagem em função do tempo foram elaboradas com o intuito de monitorizar a velocidade de secagem ao longo do processo. Não foi exequível uma análise pormenorizada do efeito da temperatura na taxa de secagem ao longo do tempo de processamento. Deste modo, procedeu-se à modelização das curvas de secagem, com base nos autores Smith e Hui, 2004 e Goyal *et al.*, 2007, apresentando-se na Figura 29 a taxa de secagem em função do tempo.

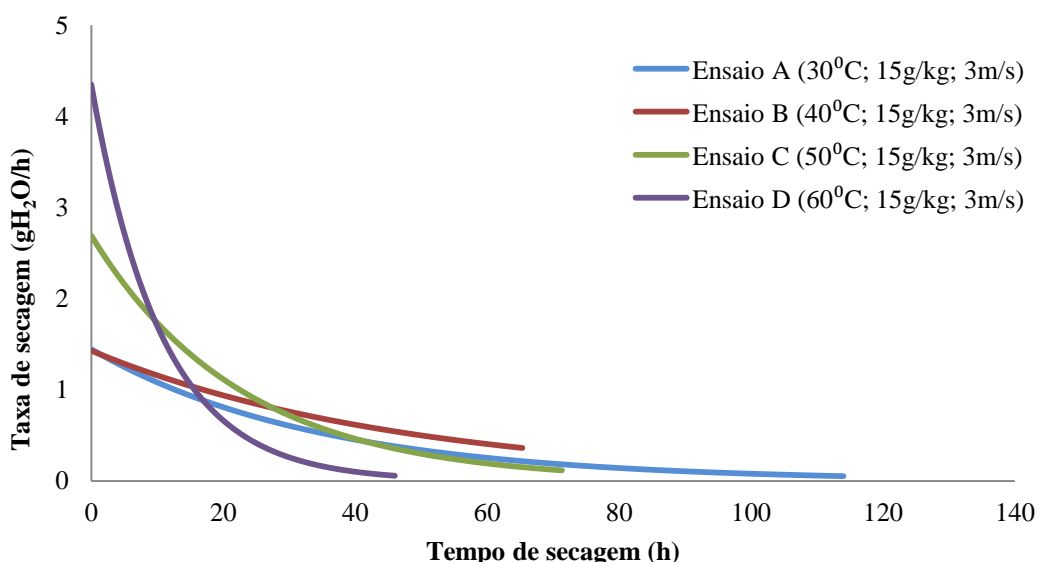


Figura 29: Representação gráfica da taxa de secagem em função do tempo de secagem para os quatro ensaios realizados, com temperaturas de secagem diferentes.

Após a observação do gráfico verificou-se que a taxa de secagem foi diminuindo ao longo do tempo de processamento. No início da secagem a transferência de calor entre o ar que circula no secador e a fruta comanda a cinética de secagem, pois a evaporação da água na superfície da pera é rápida. Com o decorrer da experiência a velocidade de secagem diminuiu, pois a perda de água na pera depende do mecanismo pelo qual a água no interior do sólido se move para a superfície. No caso de frutas o movimento é lento e ocorrerá por difusão da água através da sua estrutura.

Pôde-se analisar que para os ensaios com temperaturas superiores (50°C e 60°C) a taxa de secagem no início foi superior comparativamente às temperaturas de 30°C e 40°C. Sensivelmente a partir das 20 horas de processamento, em todas as experiências realizadas, os valores das taxas de secagem convergiram para níveis cada vez mais baixos. Este facto indica que a temperatura do ar tem maior importância na taxa de secagem no início do processamento.

Outra análise referente ao estudo do processo de secagem é a construção de curvas que relacionam a taxa de secagem em função da humidade da pera, como descrito na Figura 30.

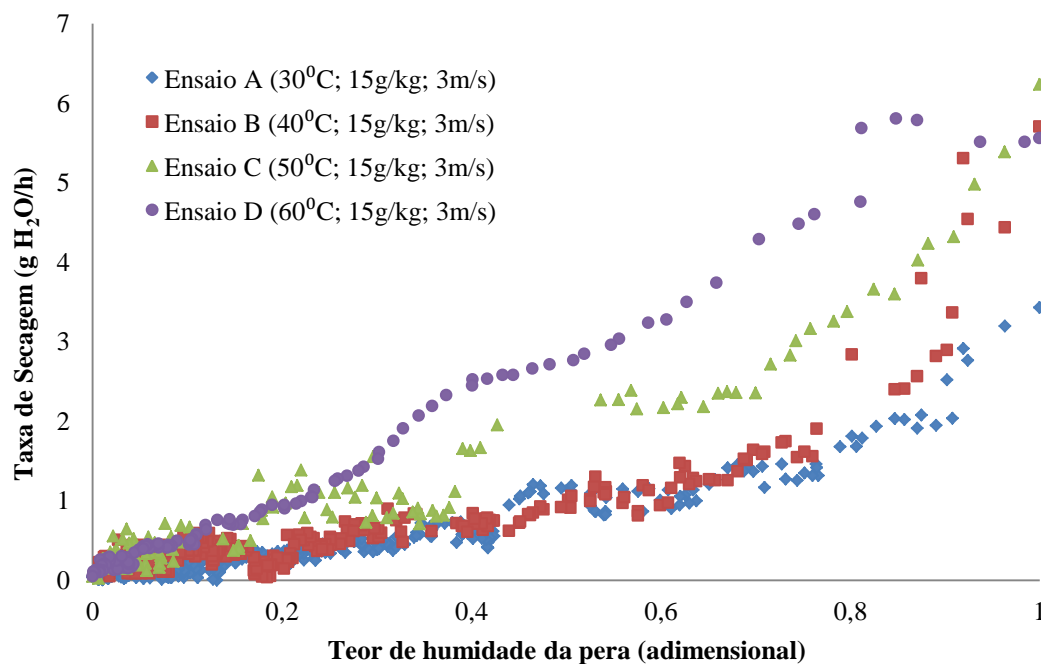


Figura 30: Representação gráfica da taxa de secagem em função da humidade para os quatro ensaios realizados, com temperaturas de secagem diferentes.

A partir da análise da Figura 30 verificou-se uma diminuição da taxa de secagem à medida que a humidade da pera foi também diminuindo. A temperatura foi novamente o parâmetro mais influente na cinética de secagem, pois uma temperatura de secagem mais elevada implicou valores de taxa de secagem superiores para a mesma humidade da pera. Contudo, uma maior velocidade de secagem motivada por temperaturas superiores resulta numa perda da qualidade do produto. Quando a humidade da superfície do produto é removida mais rapidamente do que a difusão da água, no interior do alimento, pode ocorrer o endurecimento. Importa existir um equilíbrio entre a humidade da pera e a taxa de secagem alcançada, pois a fruta apresenta uma humidade inicial elevada.

Nos ensaios efetuados a 30°C e 40°C, por exemplo, foi interessante observar que um teor de humidade no produto de 0,7g H₂O/g pera possibilitou, aproximadamente, a mesma taxa de secagem. Este facto revelou que a utilização de 40°C é vantajosa a partir desse ponto, pois a secagem iria ser mais rápida sem grandes alterações do conteúdo de água presente na pera.

Embora o estudo da cinética de secagem tenha incidido maioritariamente sobre a Pera Rocha averiguou-se também, o comportamento da Maçã Malápico da Serra. Desta forma, comparou-se os dois frutos numa experiência isolada com as seguintes condições de secagem: temperatura de secagem de 50°C, humidade absoluta de 15g H₂O/kg de ar e velocidade do ar de 3 m/s. A maçã teve um tempo de secagem de 75 horas, enquanto a pera 72 horas. No que diz respeito aos teores de humidades iniciais foram 86% e 88% para a maçã e pera, respetivamente. Os teores de humidades finais para a maçã seca foi de 33% e para a pera seca de 22%.

Na Figura 31 apresenta-se a taxa de secagem em função do teor de humidade para os dois frutos analisados.

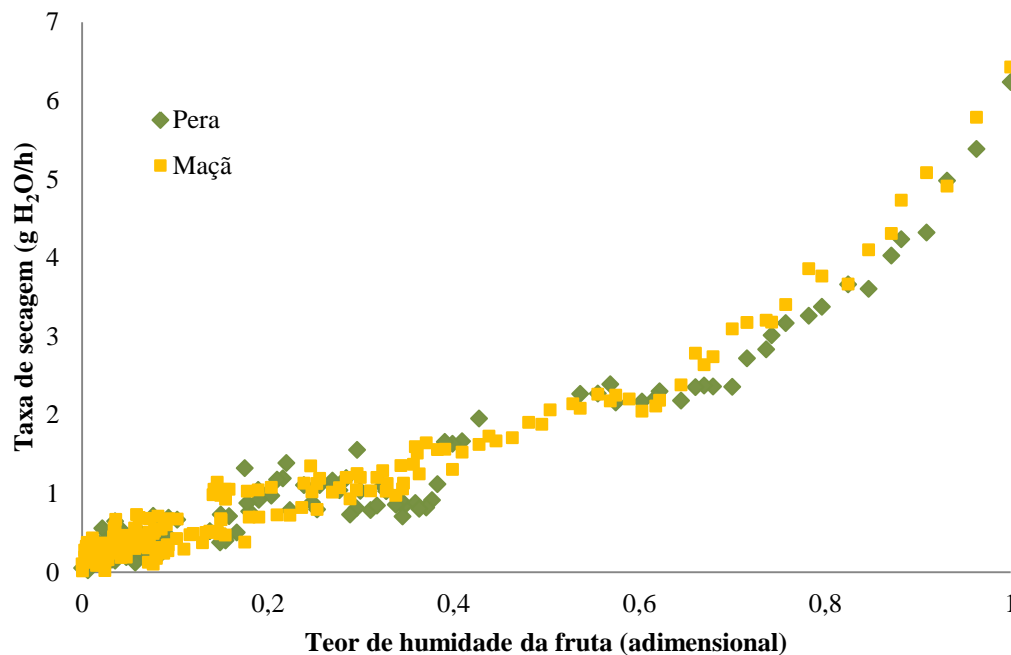


Figura 31: Representação gráfica da taxa de secagem em função da humidade dos dois frutos, para o ensaio de secagem com as seguintes condições: 50°C, 15 gH₂O/kg de ar seco e 3 m/s.

A cinética de secagem da maçã demonstrou ser muito idêntica à da pera para esta condição de secagem, como se pôde verificar pela sobreposição das curvas de secagem. De um modo geral, não são notáveis grandes diferenças na composição e estrutura dos dois frutos, logo os mecanismos internos de perda de água pressupõem-se que sejam semelhantes no processo de secagem.

III.2.2. Determinação da atividade da água (a_w)

Sobre o ponto de vista de processamento o teor de humidade do alimento determina a extensão da transferência de humidade, ou seja, avalia a cinética de secagem. Contudo, a atividade da água é um parâmetro de qualidade importante na avaliação da estabilidade dos alimentos.

As medições de atividade da água nas peras e maçãs secas, por diferentes temperaturas de secagem, apresentam-se na Tabela 6.

Tabela 6: Registo dos valores de atividade da água para as diferentes temperaturas de secagem efetuadas.

Ensaio	Atividade da água (a_w)	
	Pera Roccha	Maçã Malápio da Serra
A (30°C; 15g/kg; 3m/s)	0,675±0,021	—
B (40°C; 15g/kg; 3m/s)	0,543±0,015	0,490±0,004
C (50°C; 15g/kg; 3m/s)	0,491±0,025	0,410±0,003
D (60°C; 15g/kg; 3m/s)	0,477±0,007	0,360±0,004

Os valores são uma média (\pm desvio padrão) de várias medições efetuadas.

Como se pôde visualizar na Tabela 6, a atividade da água da fruta seca está relacionada com a temperatura de secagem aplicada. À medida que a temperatura de secagem aumenta, a atividade da água das amostras diminui. Durante a desidratação, uma temperatura elevada provoca a remoção mais eficaz da humidade livre do alimento ao longo de todo o processo, o que implica menos quantidade de água disponível, ou seja, menor a_w .

O valor determinado de atividade da água para o ensaio A ($a_w=0,675$) foi um pouco comprometedor no que se refere à segurança e estabilidade destas amostras. Geralmente, a maioria dos alimentos secos apresentam um valor de a_w menor que 0,6, para que se possa garantir um armazenamento seguro. Em relação aos outros ensaios realizados obteve-se valores de a_w que garantem a conservação da fruta seca, porque evita-se o crescimento microbiano e as reações químicas indesejáveis. É também de referir os valores mais baixos de atividade da água para a maçã seca quando comparado com a pera seca.

O ensaio com uma temperatura de secagem de 30°C na maçã não se concretizou, pois as maçãs oxidavam excessivamente e esse resultado obtido era bastante desfavorável para a aceitação do produto.

III.2.3. Análise da textura

A secagem por convecção provoca alterações físicas e químicas na estrutura e composição das frutas. Uma das principais mudanças físicas que influenciam a estrutura durante a secagem é o encolhimento. A extensão do encolhimento e o estado das estruturas afetadas depende dos parâmetros do processo, tal como a temperatura.

Na Tabela 7 mostra-se os atributos de textura determinados (dureza, coesividade, elasticidade e mastigabilidade) a partir do método de Análise de Perfil de Textura (TPA), para as amostras da Pera Rocha e da Maçã Malápio da Serra, realizadas a temperaturas de secagem diferentes.

Tabela 7: Registo dos valores da dureza, da coesividade, da elasticidade e da mastigabilidade obtidos para a Pera Rocha e para a Maçã Malápio da Serra, sujeitas a diferentes temperaturas de secagem.

	Ensaio	Dureza (N)	Coesividade	Elasticidade	Mastigabilidade (N)
Pera Rocha	30°C	9,18±2,21 ^b	0,33±0,13 ^c	0,87±0,23 ^a	2,52±1,23 ^b
	40°C	12,96±4,04 ^a	0,43±0,11 ^a	0,86±0,18 ^a	4,86±2,12 ^c
	50°C	13,77±3,41 ^a	0,17±0,07 ^b	0,54±0,22 ^b	1,32±0,93 ^a
	60°C	15,87±3,27 ^c	0,39±0,13 ^a	0,96±0,21 ^a	6,05±2,95 ^d
Maçã Malápio da Serra	40°C	10,28±1,59 ^d	0,31±0,08 ^a	1,20±0,34 ^{b c}	3,91±2,59 ^a
	50°C	13,24±2,26 ^a	0,29±0,09 ^a	1,34±0,40 ^c	5,24±2,72 ^{a b}
	60°C	15,26±2,22 ^{b c}	0,29±0,12 ^a	1,04±0,33 ^{a b}	4,94±3,08 ^{a b}

Os valores são uma média (\pm desvio padrão) de várias medições efetuadas. Colunas com a mesma letra não são estatisticamente diferentes ($p < 0,05$).

Comparando a textura das duas frutas secas verificou-se a sua parecença em relação aos parâmetros de textura determinados. A dureza dos dois frutos foi aumentando com a temperatura de secagem. Os valores de coesividade e de elasticidade da maçã e da pera secas não foram praticamente alterados pela temperatura de secagem, à excepção da pera seca com uma temperatura de 50°C. Contudo, destacaram-se algumas divergências: a maçã seca foi mais elástica do que a pera seca, a pera foi mais coesa do que a maçã e a dureza da maçã seca a 40°C foi mais baixa.

Com o intuito de permitir uma melhor visualização do efeito da temperatura de secagem na textura das peras secas, apresenta-se nas Figuras 32, 33, 34 e 35 os atributos de textura determinados (dureza, coesividade, elasticidade e mastigabilidade) para os quatro ensaios realizados, a temperaturas de secagem diferentes.

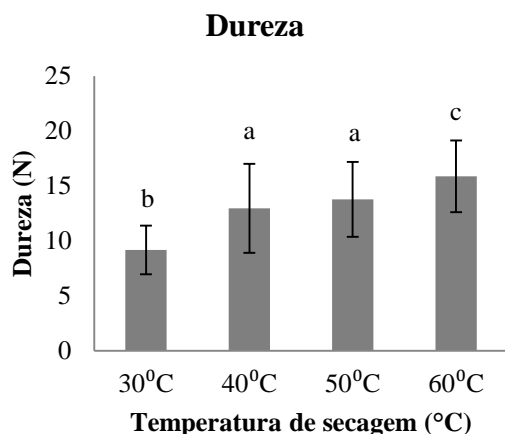


Figura 32: Dureza da Pera Rocha seca a diferentes temperaturas. Colunas com a mesma letra não são estatisticamente diferentes ($p < 0,05$).

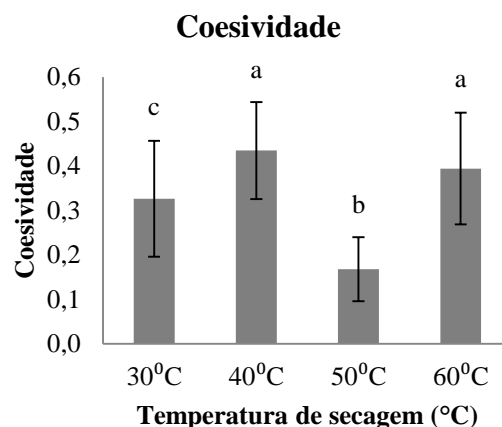


Figura 33: Coesividade da Pera Rocha seca a diferentes temperaturas. Colunas com a mesma letra não são estatisticamente diferentes ($p < 0,05$).

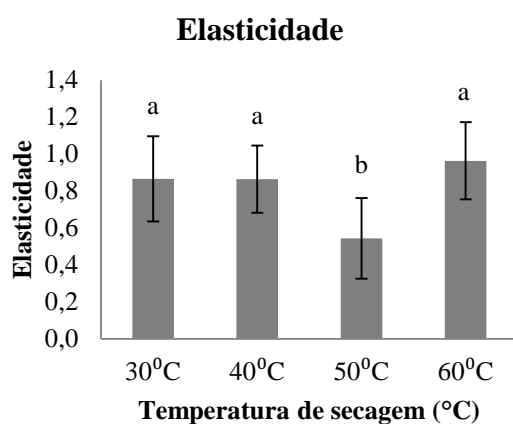


Figura 34: Elasticidade da Pera Rocha seca a diferentes temperaturas. Colunas com a mesma letra não são estatisticamente diferentes ($p < 0,05$).

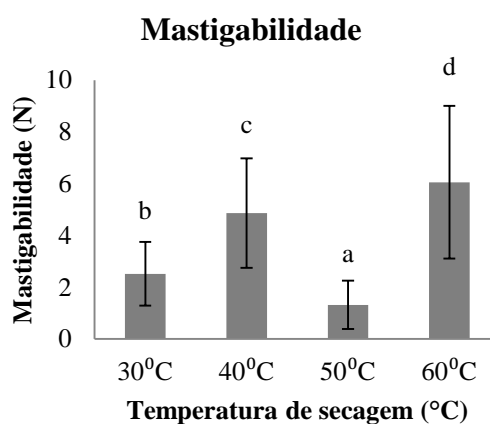


Figura 35: Mastigabilidade da Pera Rocha seca a diferentes temperaturas. Colunas com a mesma letra não são estatisticamente diferentes ($p < 0,05$).

Nos resultados obtidos para a dureza concluiu-se que o aumento da temperatura de secagem imposta conduziu a um aumento da dureza das peras secas. Porém, as amostras processadas a 40°C e 50°C não manifestaram diferenças significativas no valor de dureza determinado. A mesma correlação entre a dureza das amostras obtidas e a temperatura de secagem foi obtida noutras investigações, Troncoso e Pedreschi, 2007 e Lewicki e Jakubczyk, 2004. O endurecimento é mais ou menos acentuado consoante as alterações na

composição e na estrutura das paredes celulares, provocadas pela temperatura de secagem. Quanto maior a temperatura aplicada, maiores as forças de tensão na estrutura que levam ao endurecimento.

Os parâmetros de coesividade e elasticidade das peras secas, à excepção do ensaio a 50°C, mantiveram-se constantes perante a temperatura de processamento. As amostras geradas do ensaio a 50°C apresentaram valores inferiores relativamente a estes parâmetros de textura.

A mastigabilidade das amostras foi inferior no ensaio a 50°C, com 1,32N, porque estas apresentaram valores de coesividade e elasticidade bastantes inferiores quando comparados com os restantes ensaios. Analisando os valores de mastigabilidade para os outros ensaios verificou-se um aumento da mastigabilidade da pera seca influenciado pelo aumento de temperatura.

III.2.4. Estudo do escurecimento enzimático pela polifenoloxidase (PPO) durante a secagem

As frutas, durante o processo de secagem, apresentaram um escurecimento distinto nos quatro ensaios analisados. O motivo de estudar o escurecimento foi compreender a sua intensidade, perante as condições de secagem exigidas, com o intuito de otimizar a qualidade do produto final ao nível da cor.

O início desta pesquisa consistiu em averiguar qual a suscetibilidade da Pera Rocha e da Maçã Malápio da Serra frescas sofrerem oxidação enzimática. Na Figura 36 assinala-se a diferença através da quantificação enzimática da polifenoloxidase (PPO) para os dois frutos.

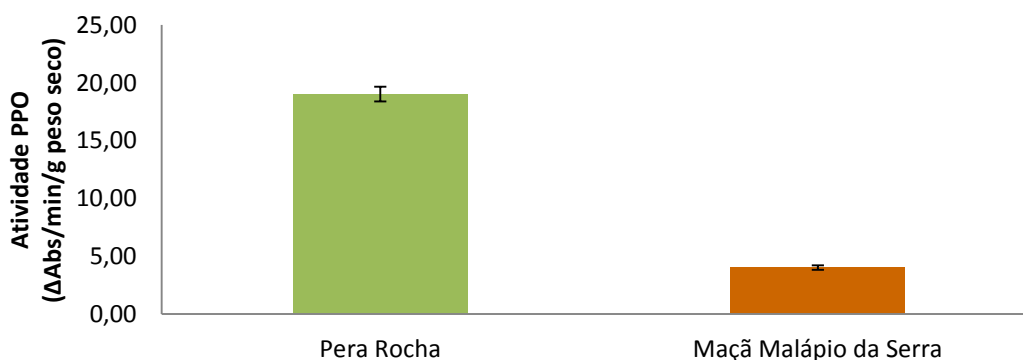


Figura 36: Registo dos valores de atividade da polifenoloxidase (PPO) para a Pera Rocha e para a Maçã Malápio da Serra frescas.

Atendendo aos valores determinados de atividade enzimática da polifenoloxidase (PPO) nos dois frutos, encontrou-se uma diferença assinalável. A PPO na Pera Rocha apresentou uma atividade enzimática superior ao da Maçã Malápio da Serra. Sendo possível afirmar que a pera é bastante mais suscetível ao escurecimento enzimático. Esta divergência nas atividades da PPO pode ser vantajosa quando o objetivo é a secagem destes dois tipos de fruto. Isto deve-se ao facto da pera beneficiar de uma coloração final mais escura, ou seja, mais oxidada. Uma vez que comercialmente esta coloração pode significar uma maior aceitabilidade pelo consumidor, ao contrário do que acontece na maçã seca.

De modo a perceber a mudança de cor da fruta seca pelos ensaios de secagem realizados, com quatro temperaturas distintas, apresenta-se nas Figuras 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43 e 44 a coloração obtida.



Figura 37: Pera Rocha seca a 30°C.



Figura 38: Pera Rocha seca a 40°C.



Figura 39: Pera Rocha seca a 50°C.



Figura 40: Pera Rocha seca a 60°C.



Figura 41: Maçã Malápio da Serra seca a 30°C.



Figura 42: Maçã Malápio da Serra seca a 40°C.



Figura 43: Maçã Malápio da Serra seca a 50°C.



Figura 44: Maçã Malápio da Serra seca a 60°C.

Recorrendo às imagens fotográficas observou-se que as peras secas a 30°C exibiram uma coloração mais escura do que as restantes. As amostras dos ensaios realizados a 40°C e 60°C apresentaram igualmente uma tonalidade escura, sendo as peras secas a 50°C as mais claras.

Com base na coloração adquirida nas peras secas, ao longo dos vários ensaios, verificou-se que o ensaio A, realizado a 30°C, evidenciou melhor aptidão para a obtenção de peras com uma cor castanho avermelhado. Importa referir que esta tonalidade é bastante apreciada pelos consumidores.

À exceção do ensaio a 30°C, nas maçãs secas não houve alterações de cor perante as temperaturas aplicadas. As maçãs secas evidenciaram uma cor bastante aceitável (cor clara), pois o escurecimento na maçã não é uma modificação desejada. Como pôde ser comprovado pela cor muito pouco convidativa das maçãs secas a 30°C.

No âmbito de compreender e modelar o escurecimento da pera na secagem, a atividade enzimática da PPO durante o processo foi determinada. É de mencionar que a análise da PPO foi realizada exclusivamente à pera, pois o produto final incide na obtenção de uma

coloração final mais escura. Na Figura 45 demonstra-se a atividade enzimática em vários períodos de secagem, para diferentes temperaturas de secagem aplicadas durante o processamento.

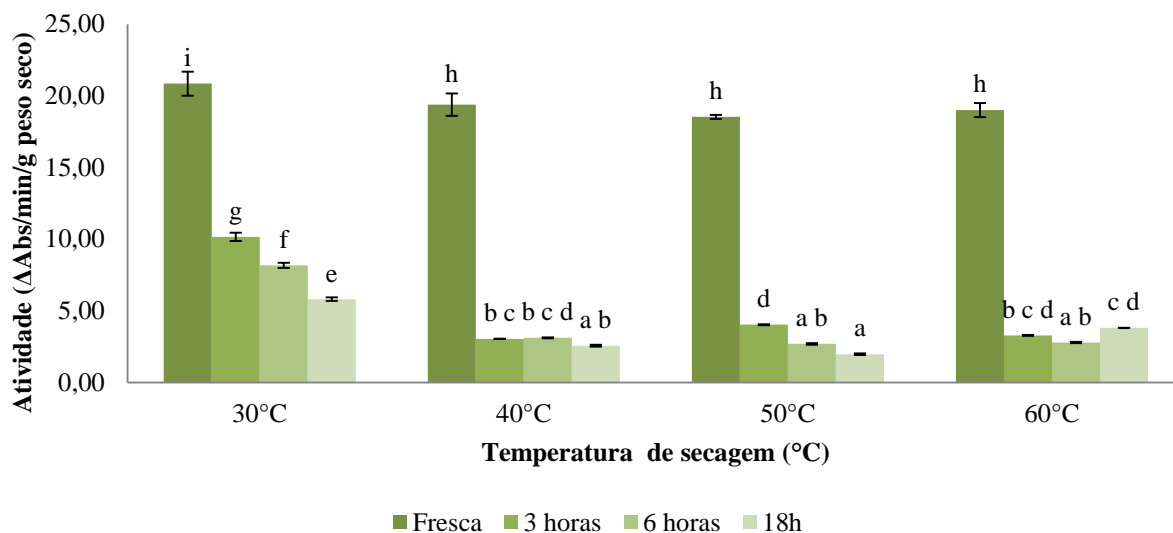


Figura 45: Registo dos valores de atividade da PPO durante a secagem para diferentes temperaturas de operação. Colunas com a mesma letra não são estatisticamente diferentes ($p < 0,05$).

Como ilustra a Figura 45 a atividade da PPO diminuiu substancialmente com o início da secagem. A diminuição da atividade da PPO foi uma variação expectável durante a secagem, de acordo com o estudo dos autores Jaiswal *et al.*, 2010 e Fernandes *et al.*, 2011, porque a diminuição da humidade da pera e, conseqüentemente, a diminuição da atividade da água dificulta a ocorrência de reações enzimáticas.

O ensaio praticado com uma temperatura de 30°C foi de destacar, porque apresentou valores de atividade enzimática mais elevados para todos os tempos de secagem. Este resultado pode ser justificado pela proximidade da temperatura ótima da PPO (intervalo ótimo da PPO é 20°C a 35°C) (Lamikanra, 2002). Neste ensaio ocorreu uma diminuição da atividade com o tempo de secagem, contudo nem todos os tratamentos verificaram a mesma cadência.

A determinação da atividade da PPO foi bastante importante para a modelação do escurecimento durante o processo de secagem da pera. A aplicação de uma temperatura de secagem de 30°C promove o escurecimento (pelo menos até 18 horas de secagem) como comprovado pela atividade da enzima. Este dado pode ser aproveitado para otimização do

processo através da utilização de uma temperatura mais elevada após aquisição da cor desejada.

III.2.5. Efeito da alta pressão no escurecimento da pera

Na tentativa de potenciar o escurecimento da pera, surgiu o processamento de alta pressão como alternativa ao pré-tratamento de secagem. As amostras de Pera Rocha foram submetidas a quatro tratamentos por alta pressão: 50MPa, 100MPa, 200MPa e 400MPa, durante 5 minutos. Para uma melhor visualização do efeito da pressão, nas Figuras 46, 47, 48, 49 e 50 apresenta-se as fotografias das amostras de peras não tratadas e de quatro ensaios sujeitos a tratamento por alta pressão.



Figura 46: Pera Rocha não tratada.



Figura 47: Pera Rocha pressurizada a 50MPa.



Figura 48: Pera Rocha pressurizada 100MPa.



Figura 49: Pera Rocha pressurizada 200MPa.



Figura 50: Pera Rocha pressurizada a 400MPa.

Nas fotografias das peras pressurizadas observou-se um aumento do escurecimento em todos os tratamentos. Embora seja difícil distinguir a intensidade da coloração das amostras foi visível um escurecimento mais suave nas peras pressurizadas a 50MPa. No sentido de investigar a ativação da polifenoloxidase (PPO) na Pera Rocha recorreu-se à análise enzimática dos vários tratamentos aplicados. Na Figura 51 apresenta-se a quantificação da atividade da PPO para os tratamentos testados.

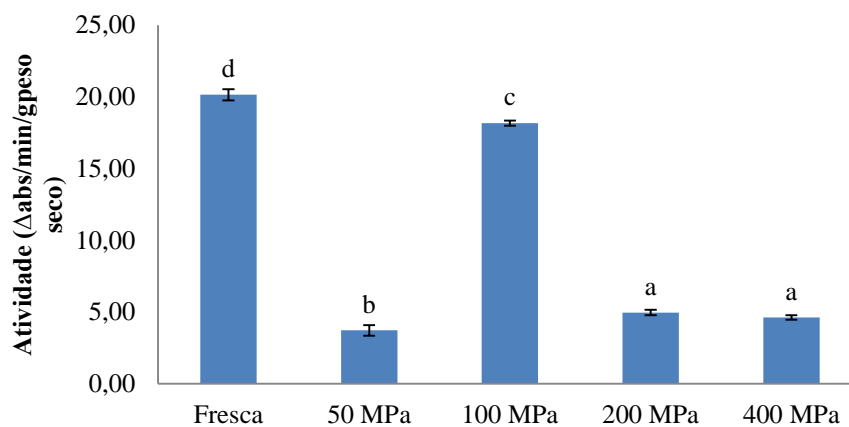


Figura 51: Registo dos valores da atividade da PPO da pera para os processamentos de 50MPa, 100MPa, 200MPa e 400MPa, durante 5 minutos.

Não foi detetada a ativação da PPO após tratamento por alta pressão, apesar de vários estudos indicarem que pressões relativamente baixas (até 400MPa) induzem o aumento da atividade enzimática (Queiroz *et al.*, 2008; Garcia-Palazon *et al.*, 2004). Porém, o tratamento efetuado a 100MPa, durante 5 minutos, registou uma atividade enzimática próxima da obtida para a pera fresca.

Contudo, todas as peras pressurizadas pelos vários tratamentos realizados aceleraram o escurecimento, tal como as investigações realizadas na pera e na maçã por Asaka e Hayashi, 1991, Barbosa-Cánovas e Gould, 2000 e Gomes e Ledward, 1996.

Após a análise dos resultados concluiu-se que o tratamento por alta pressão pode ser vantajoso para potenciar o escurecimento da pera. O efeito da alta pressão atingido nas peras revelou ter aplicabilidade como alternativa ao pré-tratamento de secagem. Esta possibilidade permite otimizar o processo de secagem, tendo em conta que a secagem a 30°C foi bastante morosa para a aquisição da cor desejada.

IV. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

A aplicação da secagem convectiva, recorrendo a um secador em túnel, mostrou ser um método eficaz de secagem de fruta inteira, nomeadamente para a pera e para a maçã. O método utilizado pode servir como alternativa à secagem tradicional ao sol, pois é um método mais rápido, monitorizável, independente das condições ambientais e com melhor qualidade higiene-sanitária.

Os ensaios realizados exibiram curvas de secagem harmoniosas e distintas, dependendo das condições de secagem impostas. Constatou-se que a temperatura do ar desempenha um papel fulcral ao nível da cinética de secagem, comparativamente à velocidade e humidade do ar. Uma temperatura de ar de secagem maior resulta numa taxa de secagem mais elevada e, consequentemente, uma diminuição da humidade do fruto mais acentuada.

A atividade da água diminui com a remoção do conteúdo de humidade na secagem. A fruta seca, proveniente das várias experiências praticadas, apresentou globalmente valores de atividades da água suficientemente baixos para garantir a prevenção do desenvolvimento de microrganismos e de reações químicas e enzimáticas indesejáveis.

Das análises efetuadas aos atributos de textura das peras secas, por diferentes condições de secagem, verificou-se diferenças ligeiras. Concluiu-se que a utilização de temperaturas de secagem mais elevadas promovem a produção de peras mais duras, bem como uma humidade absoluta igual ou superior 15g H₂O/kg de ar seco originam peras secas com maior coesividade e elasticidade. Comparando os dois frutos, as maçãs secas foram mais elásticas do que a peras secas, enquanto as peras foram mais coesas do que as maçãs.

Atendendo às qualidades organoléticas das peras secas testadas na análise sensorial, os provadores apreciaram as peras de uma forma positiva, afirmando que o produto poderá ter valor comercial. Um aspeto importante foi a intensidade da cor adquirida (castanho avermelhado) pela sua elevada aceitação. Relativamente à maçã seca a mínima degradação da cor natural torna-a mais apelativa.

O estudo do escurecimento enzimático assinalou a diminuição da atividade da polifenoloxidase com o processo de secagem. Os valores de atividade enzimática mais elevados, durante a secagem, foram os do ensaio praticado com uma temperatura de 30°C. Concluiu-se que a utilização de uma temperatura de secagem de 30°C promove de uma forma mais eficaz o escurecimento.

O tratamento por alta pressão demonstrou ter potencial como pré-tratamento de secagem. Embora não fosse detetada a ativação da polifenoloxidase, as peras pressurizadas pelos vários tratamentos realizados aceleraram o escurecimento.

O trabalho desenvolvido conduz um conjunto de investigações futuras relativas ao desenvolvimento da tecnologia de secagem de fruta.

Ao nível da matéria-prima, seria importante existir um controlo do estado de maturação prevenindo a sua interferência no processo de secagem e na qualidade do produto final. Para o descasque da pera seria vantajoso o desenvolvimento tecnológico, com o objetivo de preservar o pedúnculo, pois o descasque manual acarreta problemas de tempo e segurança alimentar. Também seria relevante modelar o processo de difusão dentro do fruto.

De modo a comprovar as condições ótimas de secagem obtidas individualmente para cada objeto de estudo (tempo de secagem, atividade da água, textura e cor), seria importante realizar experiências de confirmação. Agregando os vários objetos de estudo e/ou adicionando outros, como os consumos energéticos, segurança microbiológica, outras características organolépticas (aroma, doçura, adstringência) e valor nutricional.

Outra sugestão seria a combinação de diferentes condições de secagem durante o período de secagem estabelecido e a aplicação de uma secagem descontínua. Ambas as possibilidades permitiriam provavelmente uma poupança energética significativa e melhoria da qualidade do produto final.

Por fim proponho a investigar e a adotar tecnologias de secagem com a combinação de outras técnicas, com o intuito de diminuir o tempo de operação e a melhoria da qualidade do produto. Por exemplo, o tratamento por alta pressão tem influência no escurecimento da pera. Contudo seria pertinente verificar o mesmo efeito ou outros durante a secagem, como modificações ao nível da textura e aumento da velocidade de secagem.

V. Referências

- Asaka, M. e Hayashi, R. (1991). *Activation of Polyphenoloxidase in Pear Fruits by High Pressure*. *Agricultural and Biological Chemistry*. 55, 2439-2440.
- Associação Nacional de Produtores de Pera Rocha – ANP. (2012). Pera Rocha do Oeste. <http://www.perarocha.pt/>. Consultado em 15 de Junho de 2012.
- Associação para o Estudo e Promoção das Artes Culinárias. (2009). Os Gestos dos Sabores – Das memórias ao futuro. In. <http://videos.sapo.pt/3hWfORPADeCupeNeJng6>. Consultado em 1 de Outubro de 2011.
- Assunção, A., Oliveira, M. e Pereira, O. M. (2000). *Maçã-Variedades e Produções*. Portugal: Direção Regional de Agricultura de Entre - Douro e Minho. pp. 17-29,55.
- Barbosa-Cánovas, G. V. e Vega-Mercado, H. (1996). *Dehydration of Foods*. New York: Chapman & Hall.
- Barbosa-Cánovas, G. V. e Gould, G. W. (2000). *Innovations in Food Processing*. U.S.A.: Technomic Publishing Company. pp. 73-101.
- Belitz, H.-D., Grosch, W. e Schieberle, P. (2009). *Food Chemistry*. Germany: Springer. pp. 1-7, 807-891.
- Boeri, C., Silva, F., Ferreira, J. e Santos, M. (2011). *Optimized Operating Drying Control For Temperature, Relative Humidity and Air Velocity Parameters by Means of Fuzzy Logic Approach*. European Drying Conference - EuroDrying'2011. Aveiro: Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.
- Brennan, J. G. (2006). *Food Processing Handbook*. Weinheim: Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. pp. 85-124.
- Bretauudeau, J. e Fauré, Y. (1991). *Cultura de Árvores de Fruto* (Vol. II). Portugal: Publicações Europa-América. pp. 9-26;129-138.
- Brett, C. e Waldron, K. (1998). *Physiology and biochemistry of plant cell walls* (2nd ed.). Cambridge: Chapman & Hall.
- Casp, A. e Abril, J. (1999). *Procesos de conservación de alimentos*. Madrid: Mundi-Prensa. pp. 325-398.
- Castro, S., Saraiva, J., Silva, J., Delgadillo, I., Loey, A., Smout C. e Hendrickx, M. (2008). *Effect of thermal blanching and of high pressure treatments on sweet green and red bell pepper fruits (Capsicum annuum L.)*. *Food Chemistry*. 107. 1436–1449.

Chen, X. D. e Mujumdar, A. S. (2008). *Drying Technologies in Food Processing*. United Kingdom: Blackwell Publishing Ltd. pp. 1-109.

Coimbra, M., Nunes, C., Cunha, P. e Guine, R. (2011). *Amino acid profile and Maillard compounds of sun-dried pears. Relation with the reddish brown colour of the dried fruits*. Eur Food Res Technol 233:637–646.

Cooperativa Agrícola de Mangualde. (2012). Variedades Regionais. <http://www.bravomangualde.com/pt/index.html#/macas>. Consultado em 15 Junho de 2012.

Coulson, J. M. (1977). *Chemical engineering* (3rd ed.). Oxford: Pergamon. pp. 901-917.

Cunniff, P., Official methods of analysis of AOAC international, by AOAC International, Gaithersburg (MD) (1998).

Direção Regional de Agricultura e Pescas do Centro – DRAP Centro. (2009). Projeto Agro n.º 158 – Conservação e valorização de recursos genéticos de pomóideas regionais.

http://www.drapc.minagricultura.pt/base/documentos/variedades_regionais_pomoideas_viseu.php. Consultado em 15 de Junho de 2012.

Fernandes, S., Ribeiro, C., Raposo, M., Morais, R. e Morais, A. (2011). *Polyphenol Oxidase Activity and Colour Changes of 'Starking' Apple Cubes Coated with Alginate and Dehydrated with Air*. Food and Nutrition Sciences. 2, 451-457.

Ferreira, D. (2003). *Estudo das Transformações Bioquímicas e Químicas da Pera de S. Bartolomeu Durante o Processo de Secagem - Recurso Endógeno da Região*. Departamento de Química, vol. Doutorado. Aveiro: Universidade de Aveiro.

Ferreira, D., Silva, J., Pinto, G., Santos, C., Delgadillo, I. e Coimbra, M. (2008). *Effect of sun-drying on microstructure and texture of S. Bartolomeu pears (Pyrus communis L.)*. Eur Food Res Technol. 226:1545–1552.

Foust, A. S., Wenzel, L. A., Clump, C. W., Maus, L. e Anderson, L. B. (1980). *Principles of Unit Operations* (2nd ed.). New York, USA,: John Wiley & Sons, Inc. pp. 401-412.

Garcia-Palazon, A., Suthanthangjai, W., Kajda, P. e Zabetakis, I. (2004). *The effects of high hydrostatic pressure on b-glucosidase, peroxidase and polyphenoloxidase in red raspberry (Rubus idaeus) and strawberry (Fragaria*ananassa)*. Food Chemistry. 88, 7–10.

Gomes, M. R. A. e Ledward, D. A. (1996). *Effect of High-Pressure treatment on the activity of some polyphenoloxidase*. Food Chemistry. 56, 1-5.

Goutier, J. (1989). *A Maçã-Variedades, Cultura, Produção*. Portugal: Publicações Europa-América. pp. 7-17.

Goyal, R., Kingsly, A., Manikantan, M. e Ilyas, S. (2007). *Mathematical modelling of thin layer drying kinetics of plum in a tunnel dryer*. Journal of Food Engineering. 79. 176–180.

Hui, Y. H. (2006). *Food Chemistry and Food Processing*. USA: Blackwell Publishing. pp. 71-78, 126,127,487-535.

Hulme, A. C. (1958). *Some aspects of the bichemistry of apple and pear fruits* (Vol. 7). New York: Academic Press Inc. pp. 297-395.

Institute, (1987) American Supplier - Introduction to Quality Engineering: Course Manual. American Supplier Institute, Center for Taguchi Methods.

Jaiswal, V., DerMarderosian, A. e Porter, J. (2010). *Anthocyanins and polyphenol oxidase from dried arils of pomegranate (Punica granatum L.)*. Food Chemistry. 118. 11–16.

Jang, J. e Moon, K. (2011). *Inhibition of polyphenol oxidase and peroxidase activities on fresh-cut apple by simultaneous treatment of ultrasound and ascorbic acid*. Food Chemistry. 124. 444–449.

Jangam, S., Law, C. e Mujumdar, A. (2010). *Drying of Foods, Vegetables and Fruits*. vol. 1. Singapura.

Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M. e Jaouhari, J. (2004). *Drying kinetics of prickly pear fruit (Opuntia ficus indica)*. Journal of Food Engineering. 61, 173-179.

Lamikanra, O. (2002). *Fresh-cut Fruits and Vegetables: Science, Technology, and Market*. USA: CRC Press LLC, pp. 142-159.

Lee, C. Y. e Whitaker, J. R. (1995). *Enzymatic Browning and Its Prevention*. Washington: Washington: ACS Symposium Series 600. pp. 251-266.

Lewicki, P. e Jakubczyk, E. (2004). *Effect of hot air temperature on mechanical properties of dried apples*. Journal of Food Engineering. 64. 307–314.

Lopéz, L. (2006). *Characterization and Modelling of Structural Changes in Fruits and Vegetable Tissue Submitted to Dehydration Processes*. Departamento de Engenharia Química, vol. Doutorado. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

MacCabe, Warren, L. (1993). *Unit Operations of Chemical Engineering* (5th ed.). New York: McGraw-Hill. pp. 767-792.

Mafra, I., Barros, A. e Coimbra, M. (2006). *Effect of Black Oxidising Table Olive Process on the Cell Wall Polysaccharides of Olive Pulp (Olea europaea L. var. Negrinha do Douro)*. Carbohydr Polym. 65:1–8.

Moita, N. (2007). *Implementação do Método Taguchi e Análise de Experiências na Fase de Testes de Moldes para Injeção de Plásticos*. vol. Mestrado. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa.

Nunes, C., Santos, C., Pinto, G., Silva, S., Silva, J., Saraiva, J. e Coimbra, M. (2009). *Effects of ripening on microstructure and texture of “Ameixa d’Elvas” candied plums*. Food Chemistry. 115, 1094–1101

Park, K., Yado, M. e Brod, F. (2001). *Estudo de secagem de Pera Bartlett (Pyrus sp.) em fatias*. Ciência e Tecnologia de Alimentos. Vol. 21, n.º 3, p. 288-292.

Queiroz, C., Lopes, M. L. M., Fialho, E. e Valente-Mesquita, V. L. (2008). *Polyphenol Oxidase: Characteristics and Mechanisms of Browning Control*. Food Reviews International. 24, 361–375.

Rahman, M. S. (2007). *Handbook of food preservation* (2nd ed.). Boca Raton: CRC Press. pp. 403-476.

Rosenthal, A. (1999). Measurement and Perception. *Food Texture*. Gaithersburg: Aspen.

Schultz, E., Mazzuco, M., Machado, R., Bolzan, A., Quadri, M. B. e Quadri, M. G. (2007). *Effect of pre-treatments on drying, density and shrinkage of apple slices*. Journal of Food Engineering. 78. 1103–1110.

Serra, A. (2010). Biochemical characterization and development of functional ingredients. *Valorization of Traditional Portuguese Apples and Cherries*. Instituto de Tecnologia Química e Biológica, vol. Doutorado. Oeiras: Universidade Nova de Lisboa.

Seymour, G. B., Taylor, J. E. e Tucker, G. A. (1993). *Biochemistry of Fruit Ripening*. London: Chapman & Hall. pp. 325-339.

Singh, R. P. e Heldman, D. R. (2001). *Introduction to Food Engineering*. London: Academic Press. pp. 557-575.

Smith, J. S. e Hui, Y. H. (2004). *Food Processing: Principles and Applications*. USA: Blackwell Publishing.

Soares, J., Silva, A. e Alexandre, J. (2001). *O livro da Pera Rocha*. Portugal: Associação Nacional de Produtores de Pera Rocha. pp. 27-36.

Somogyi, L. P., Ramaswamy, H. S. e Hui, Y. H. (1996). Biology, Principles, and Applications. In *Processing fruits: Science and Technology*, vol. 1. Pennsylvania: Technomic Publishing Company.

Valentas, K. J., Rostein, E. e Singh, R. P. (1997). Handbook of Food Engineering Practice. In G. H. Crapiste e E. Rotstein (Eds.), *Design and Performance Evaluation of Dryers*. USA: CRC Press LLC.

Troncoso, E. e Pedreschi, F. (2007). Modeling of textural changes during drying of potato slices. *Journal of Food Engineering*. 82. 577–584.

Vega-Gálvez, A., Ah-Hen, K., Chacana, M., Vergara, J., Martinez-Monzo, J., Garcia-Segovia, P., Lemus-Mondaca, R. e Scala, K. (2012). *Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. Granny Smith) slices*. *Food Chemistry*. 132, 51-59.

Waldron, K., Smith, A., Parr, A., Ng, A. e Parker, M. (1997). *New Approaches to Understanding and Controlling Cell Separation in Relation to Fruits and Vegetable texture*. *Trends Food Sci Technol*. 8:213–221.

Whitaker, J. R., Voragen, A. G. J. e Wong, D. W. S. (2003). Handbook of Food Enzimology. In E. C. Ramírez, J. R. Whitaker e V. M. Virador (Eds.), *Polyphenol Oxidase*. New York: Marcel Dekker, Inc.

Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A. S. e Wang, S. (2006). *Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables*. *Trends in Food Science & Technology*, 17 (10), 524-534.

VI. Anexos

Anexo A: Estudo do processo de secagem

Anexo A1: Controlo das condições de secagem e dados da amostra

Tabela 8: Registo do controlo dos parâmetros de secagem para os nove ensaios realizados.

Ensaio	Condições de secagem			
	Temperatura (°C)	Humidade absoluta (g/kg)	Velocidade (m/s)	Tempo (h)
1	40,77±0,75	25,69±0,97	0,51±0,09	139,67
2	40,47±1,15	10,55±0,64	1,49±0,08	95,67
3	40,47±0,90	13,73±1,04	2,99±0,12	110,00
4	50,55±1,29	15,15±0,80	0,48±0,07	79,67
5	49,43±1,03	24,49±1,38	1,51±0,14	68,00
6	50,21±0,90	10,58±0,51	2,98±0,09	65,00
7	59,48±0,82	10,11±0,64	0,51±0,15	57,00
8	59,14±0,92	15,82±0,90	1,51±0,12	45,00
9	59,14±0,68	25,19±1,04	2,99±0,13	61,00

Os valores são uma média (\pm desvio padrão) de várias medições efetuadas

Tabela 9: Registo dos valores de massa inicial e final e de humidade inicial e final da Pera Rocha para os nove realizados.

Ensaio	Dados da amostra			
	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Teor de humidade inicial	Teor de humidade final
1	72,099	16,173	0,874	0,283
2	69,602	10,673	0,883	0,216
3	66,182	10,025	0,886	0,279
4	70,102	11,600	0,899	0,195
5	53,352	8,467	0,866	0,176
6	71,949	10,800	0,902	0,208
7	67,350	8,340	0,896	0,216
8	53,353	7,085	0,875	0,196
9	78,094	13,741	0,870	0,277

Anexo A2: Curva de secagem para os nove ensaios realizados

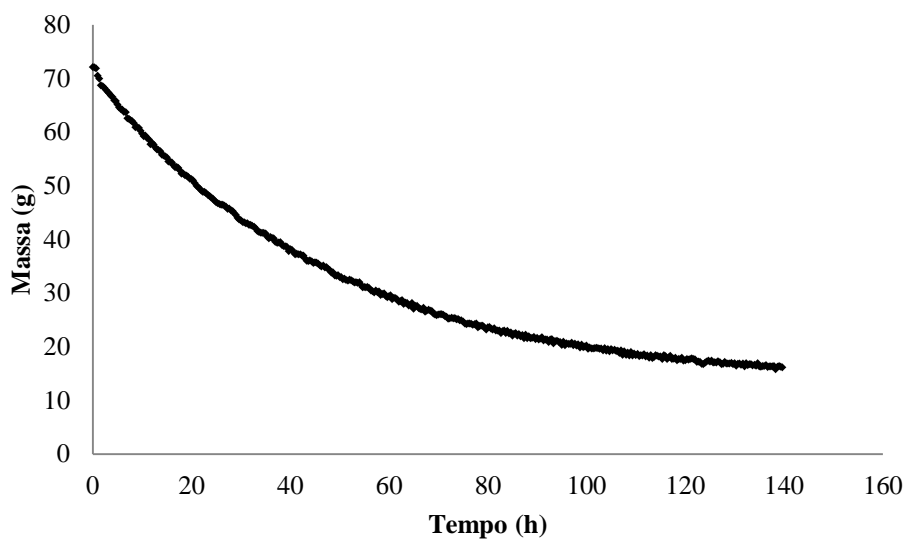


Figura 52: Comportamento da massa da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 1.

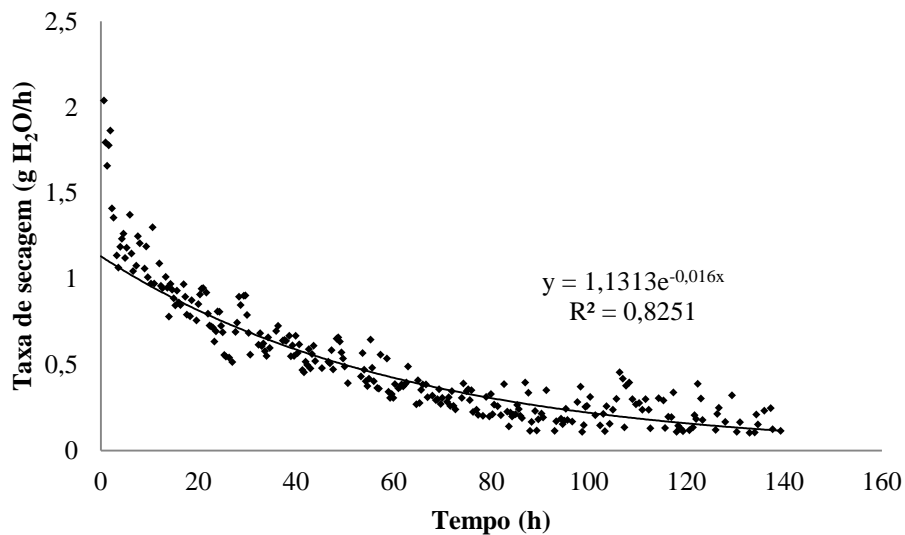


Figura 53: Taxa de secagem em função do tempo de operação para o ensaio 1.

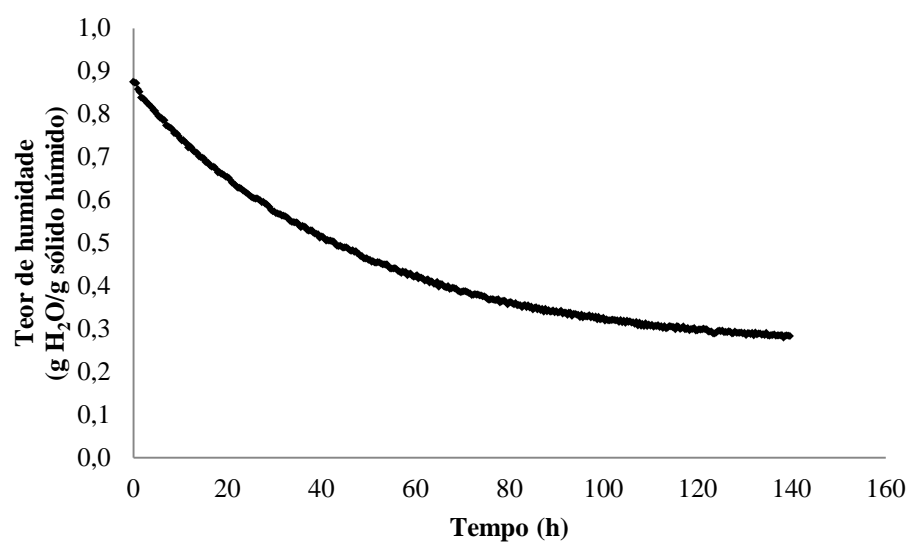


Figura 54: Variação do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 1.

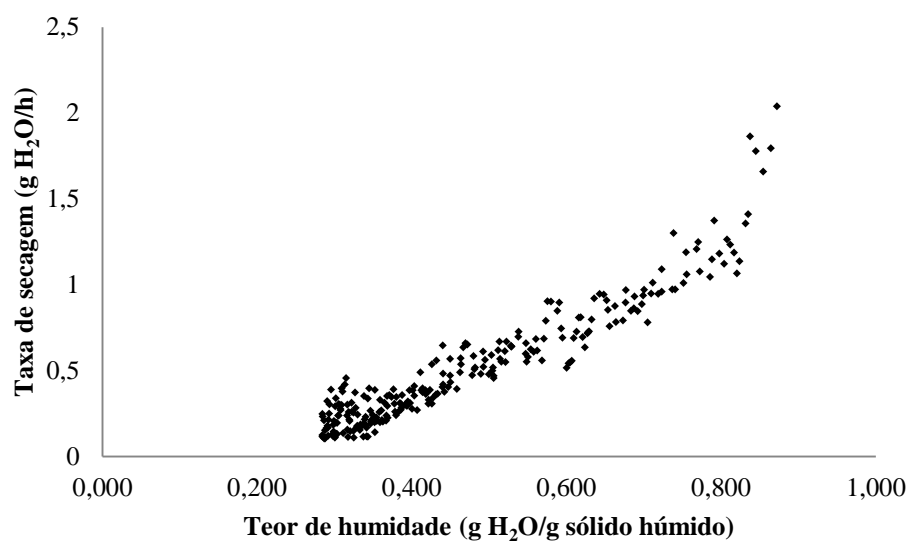


Figura 55: Taxa de secagem em função do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha para o ensaio 1.

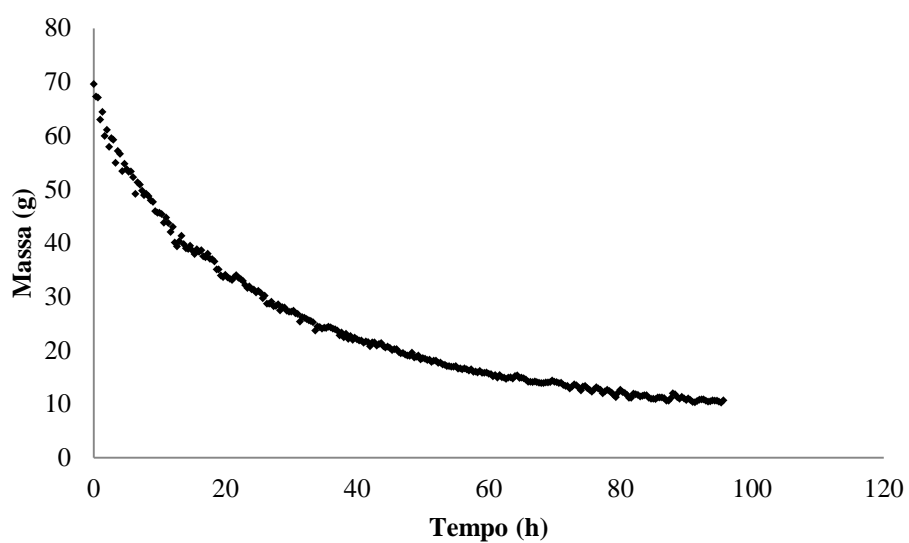


Figura 56: Comportamento da massa da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 2.

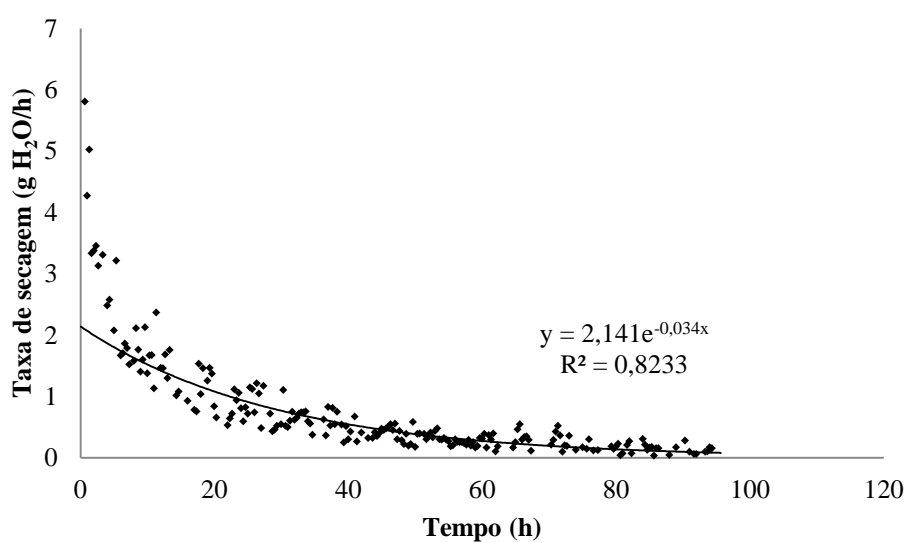


Figura 57: Taxa de secagem em função do tempo de operação para o ensaio 2.

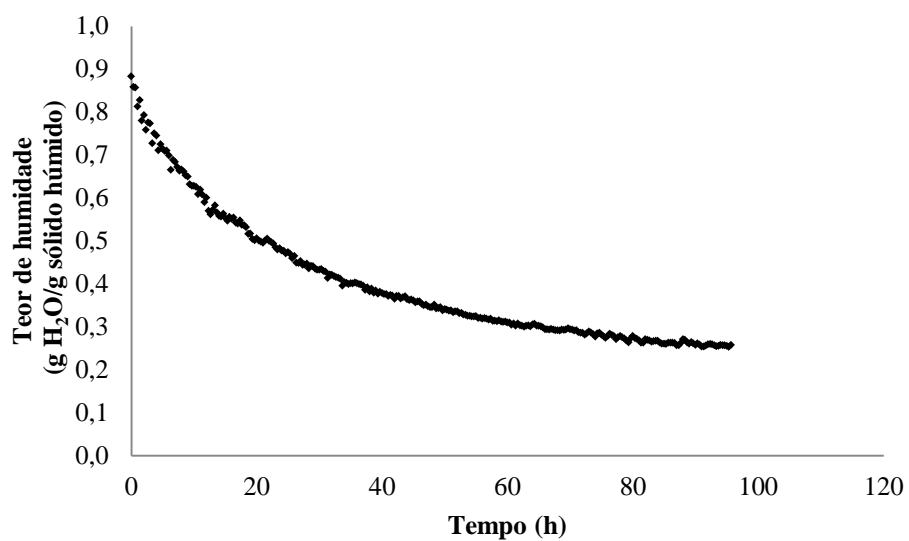


Figura 58: Variação do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 2.

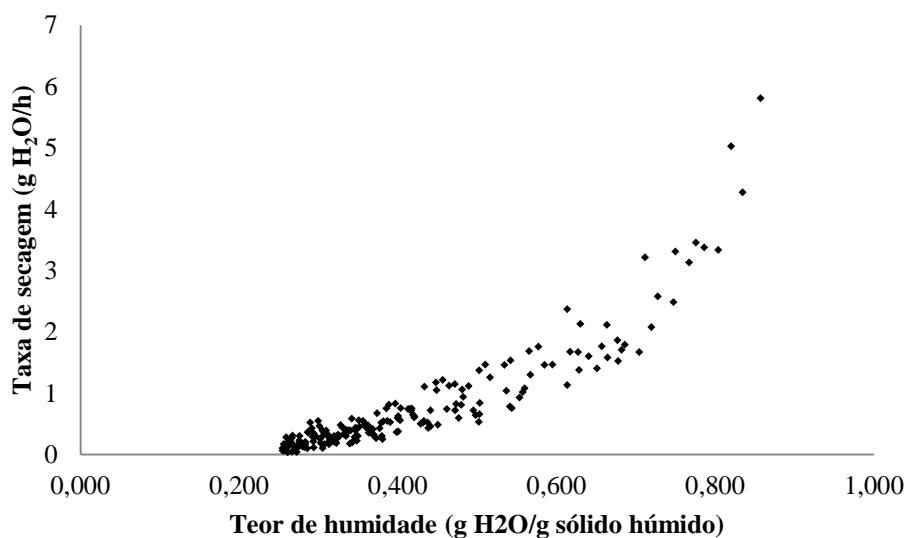


Figura 59: Taxa de secagem em função do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha para o ensaio 2.

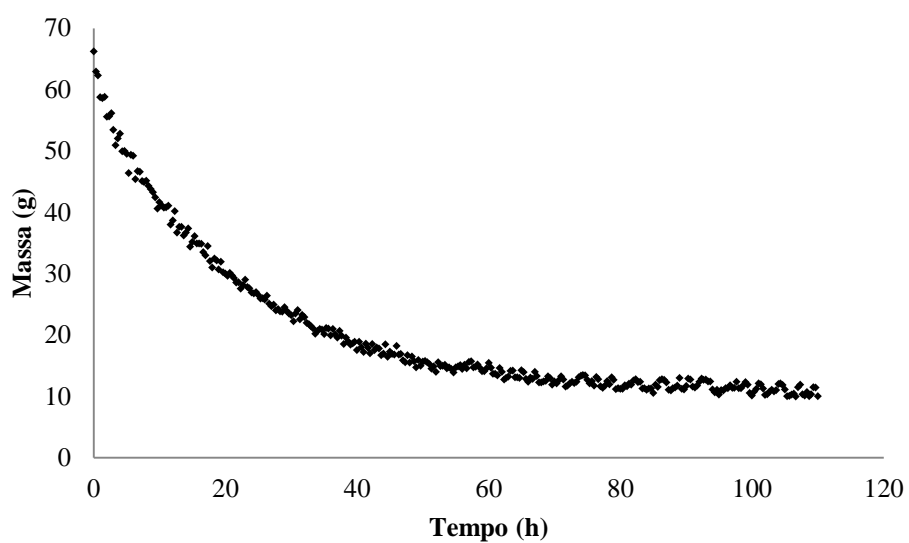


Figura 60: Comportamento da massa da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 3.

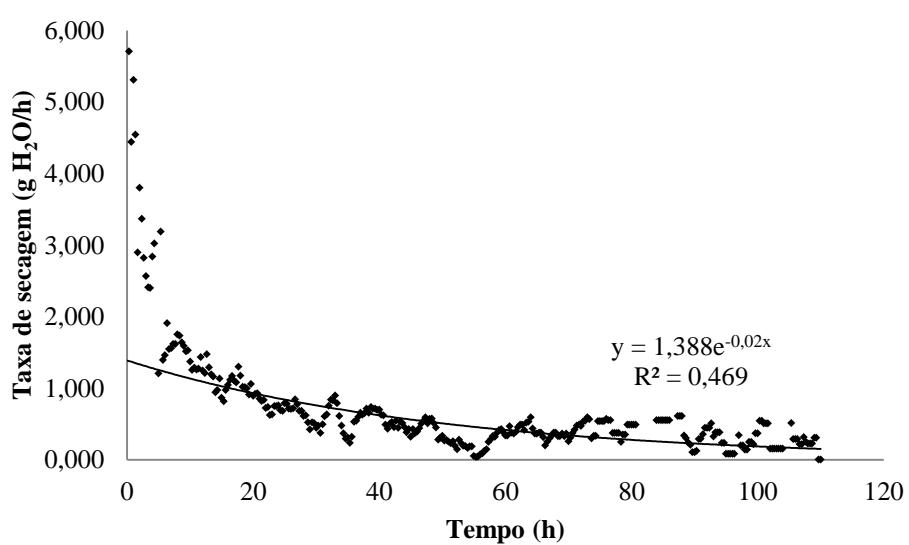


Figura 61: Taxa de secagem em função do tempo de operação para o ensaio 3.

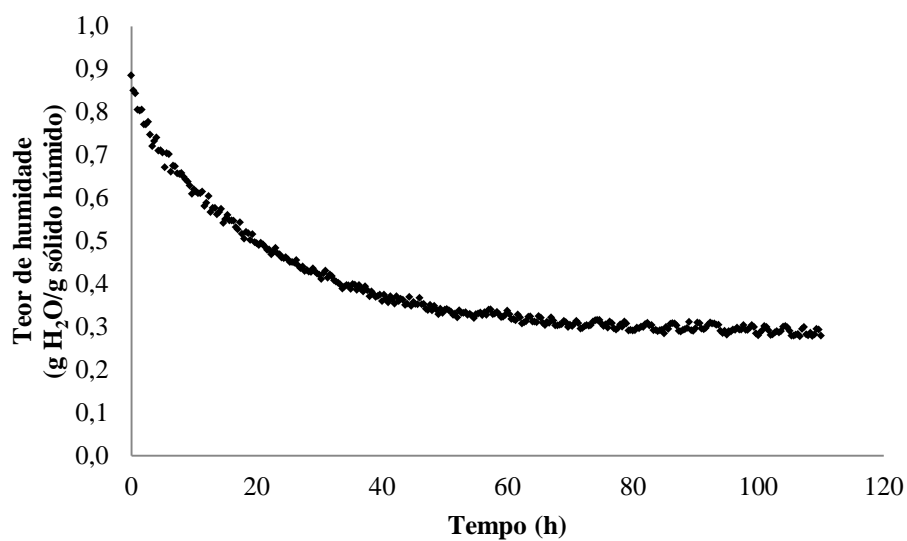


Figura 62: Variação do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 3.

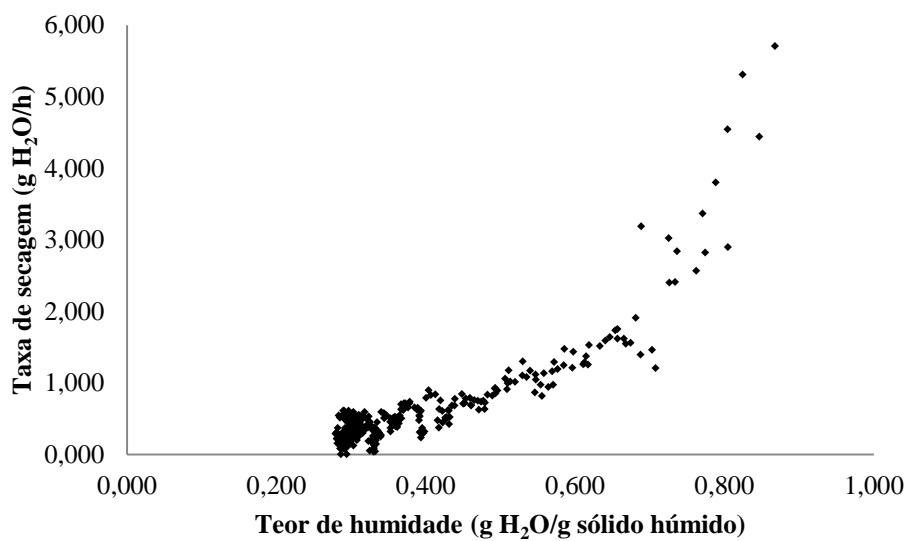


Figura 63: Taxa de secagem em função do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha para o ensaio 3.

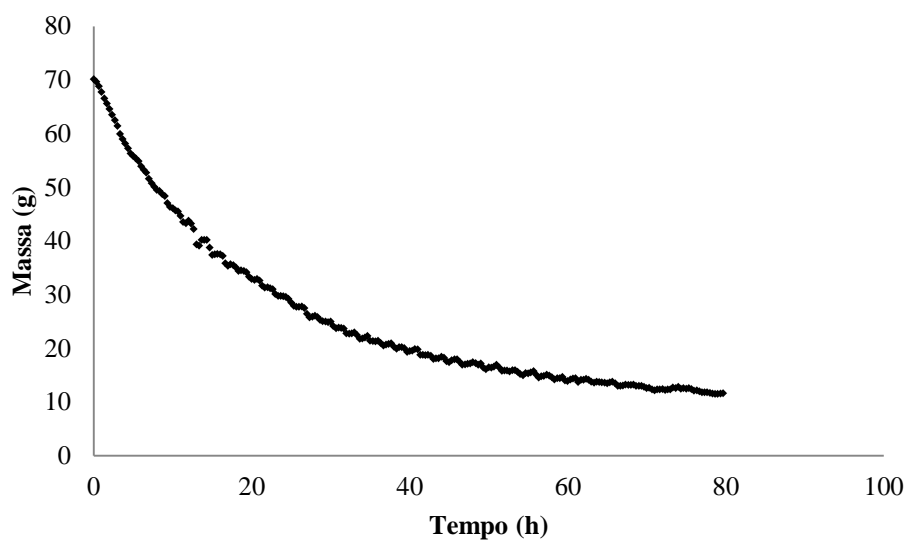


Figura 64: Comportamento da massa da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 4.

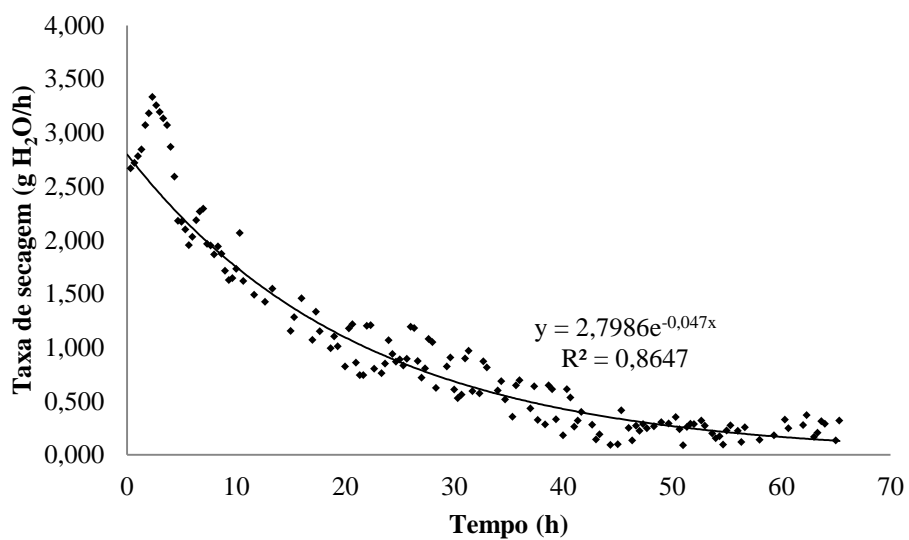


Figura 65: Taxa de secagem em função do tempo de operação para o ensaio 4.

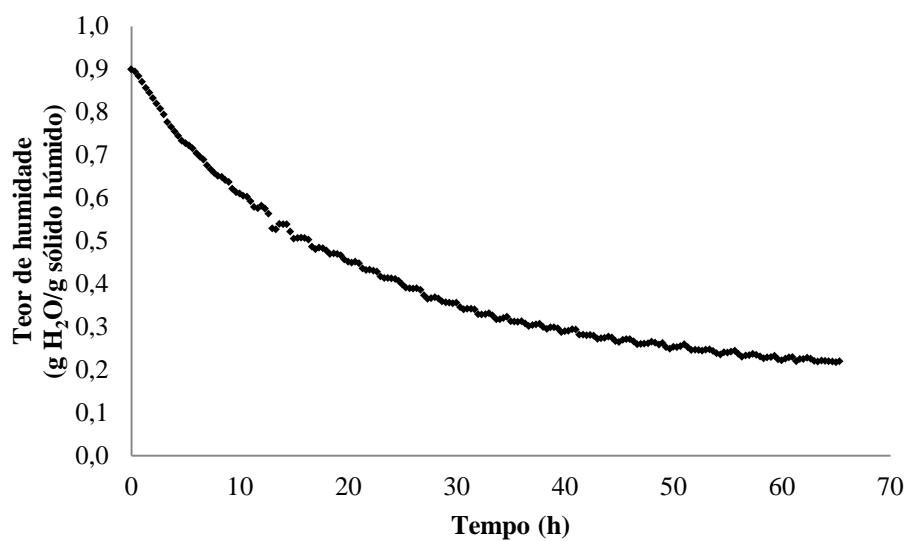


Figura 66: Variação do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 4.

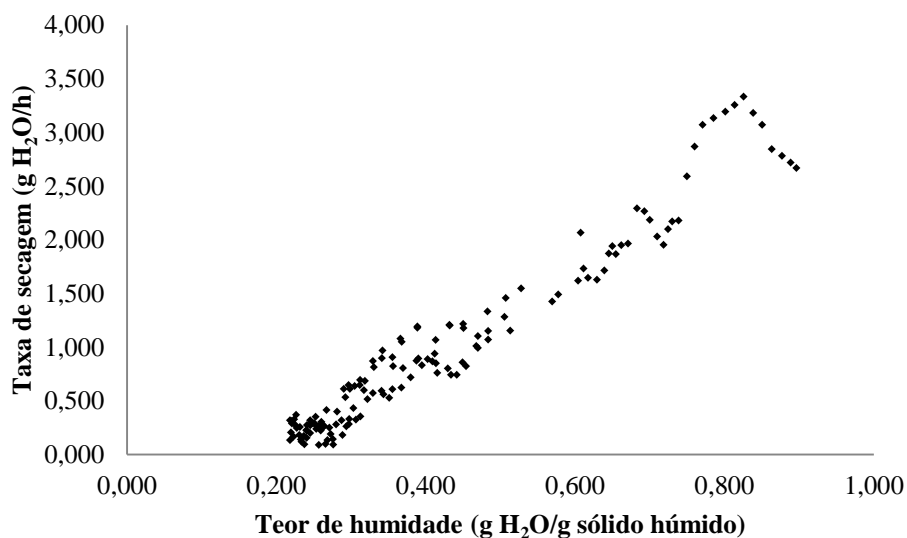


Figura 67: Taxa de secagem em função do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha para o ensaio 4.

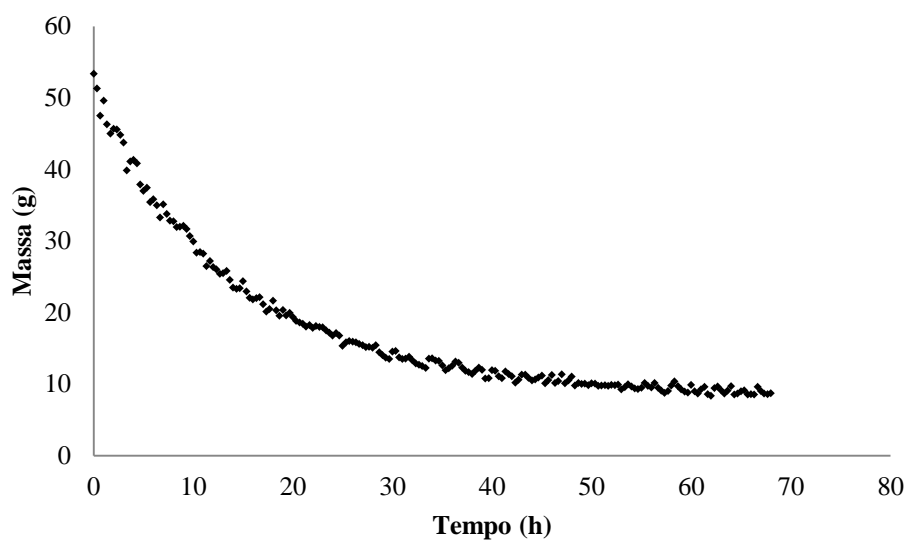


Figura 68: Comportamento da massa da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 5.

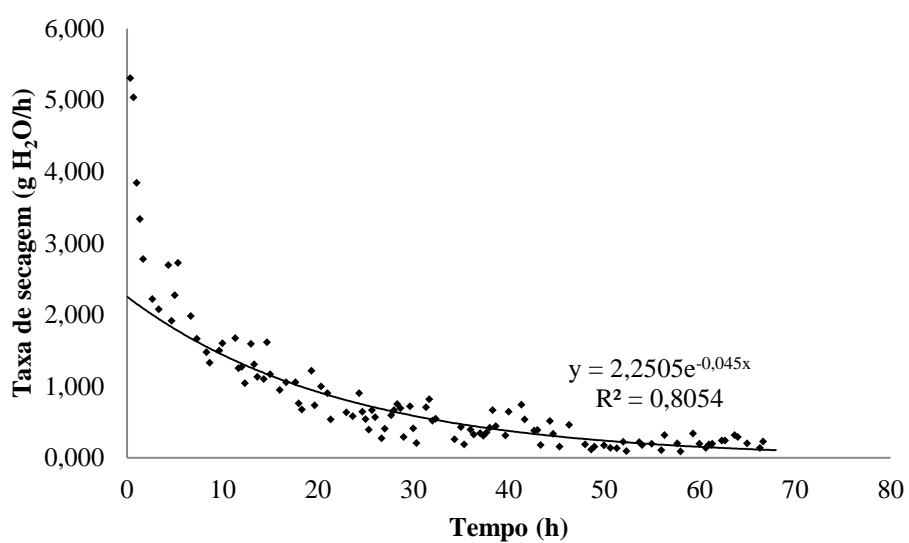


Figura 69: Taxa de secagem em função do tempo de operação para o ensaio 5.

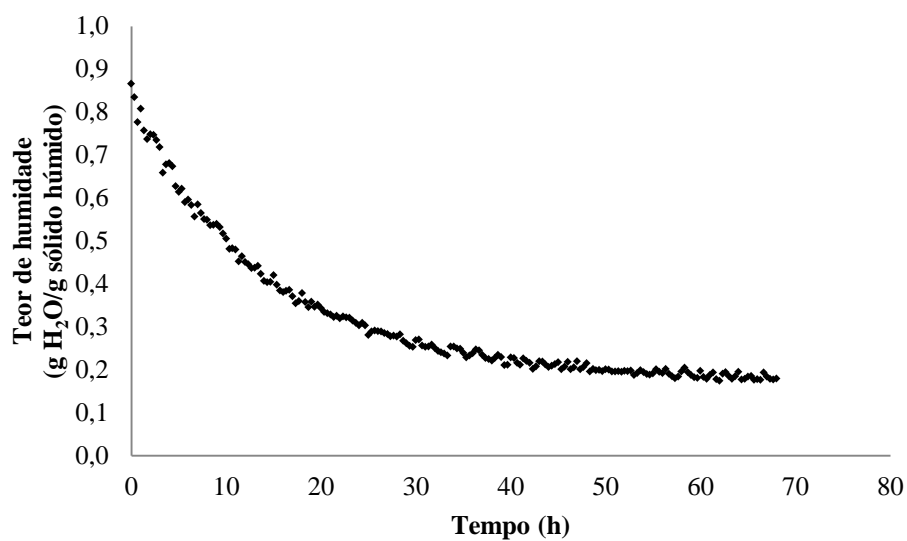


Figura 70: Variação do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 5.

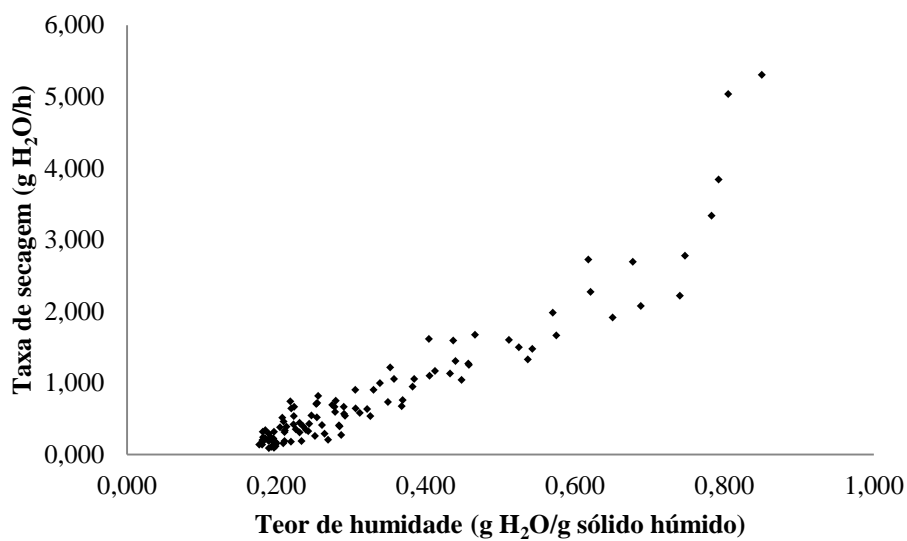


Figura 71: Taxa de secagem em função do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha para o ensaio 5.

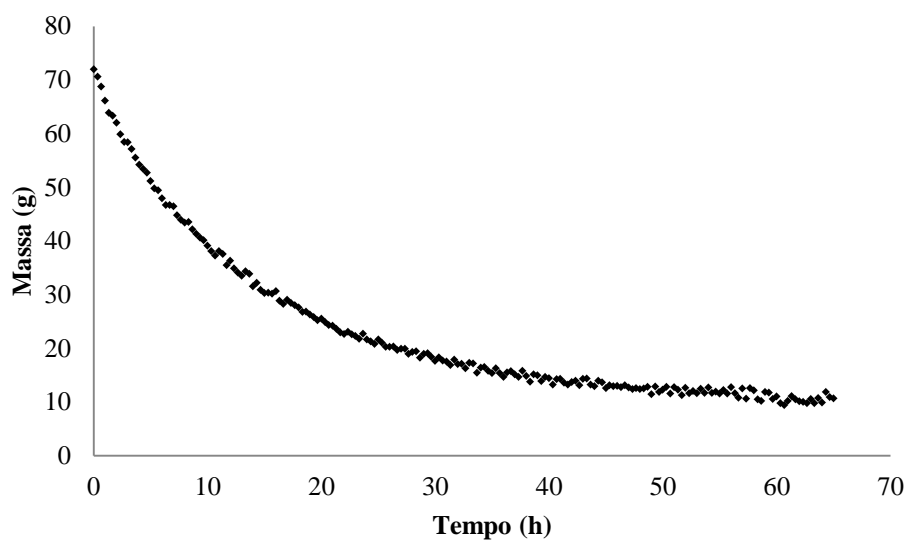


Figura 72: Comportamento da massa da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 6.

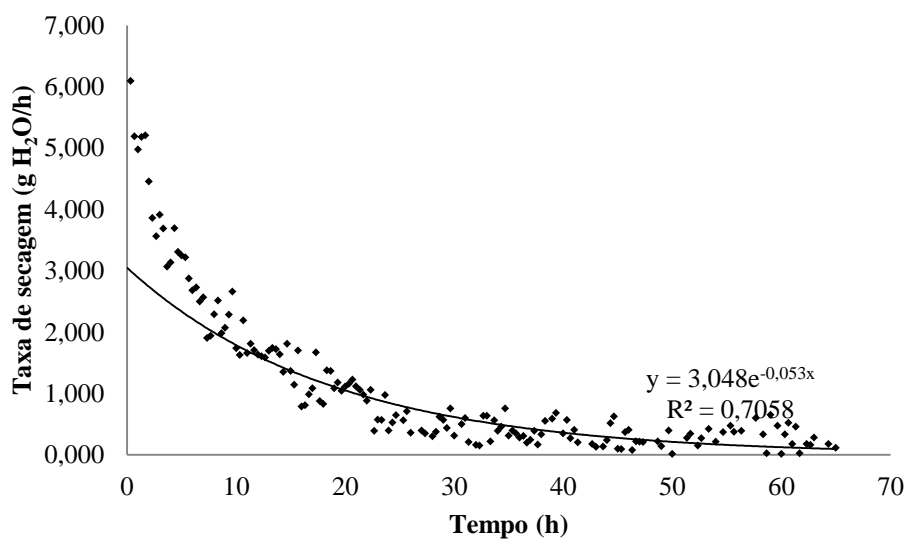


Figura 73: Taxa de secagem em função do tempo de operação para o ensaio 6.

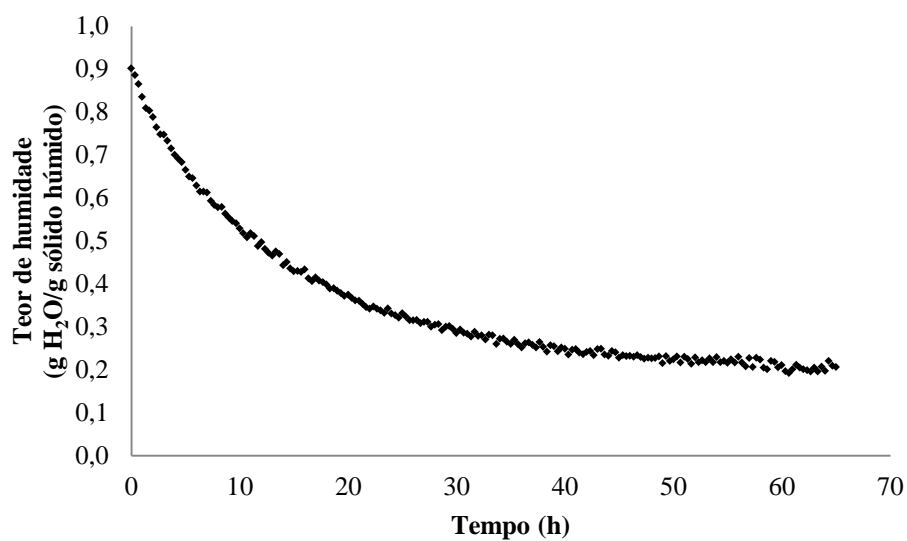


Figura 74: Variação do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 6.

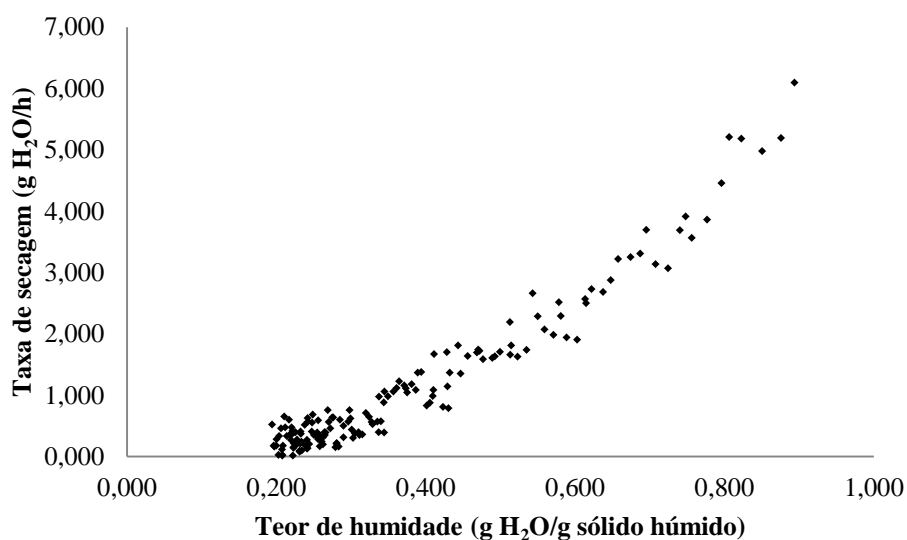


Figura 75: Taxa de secagem em função do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha para o ensaio 6.

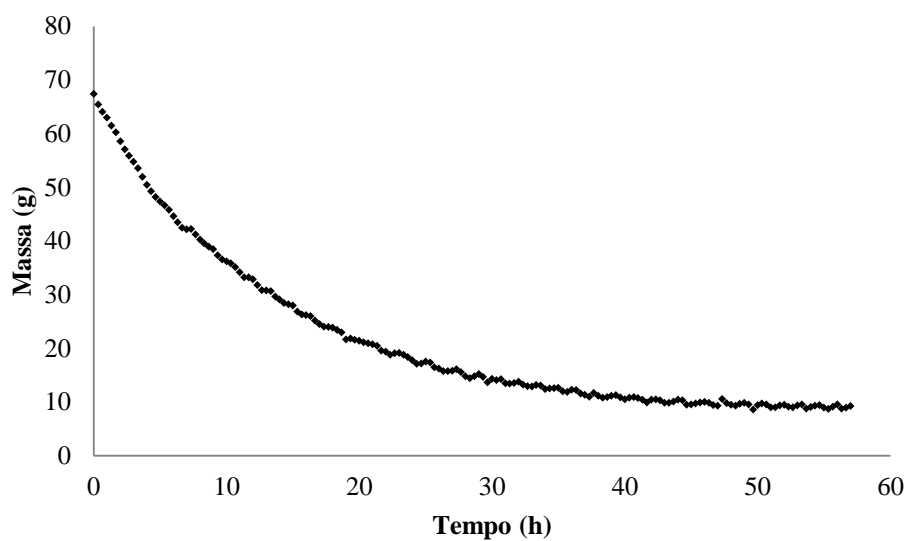


Figura 76: Comportamento da massa da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 7.

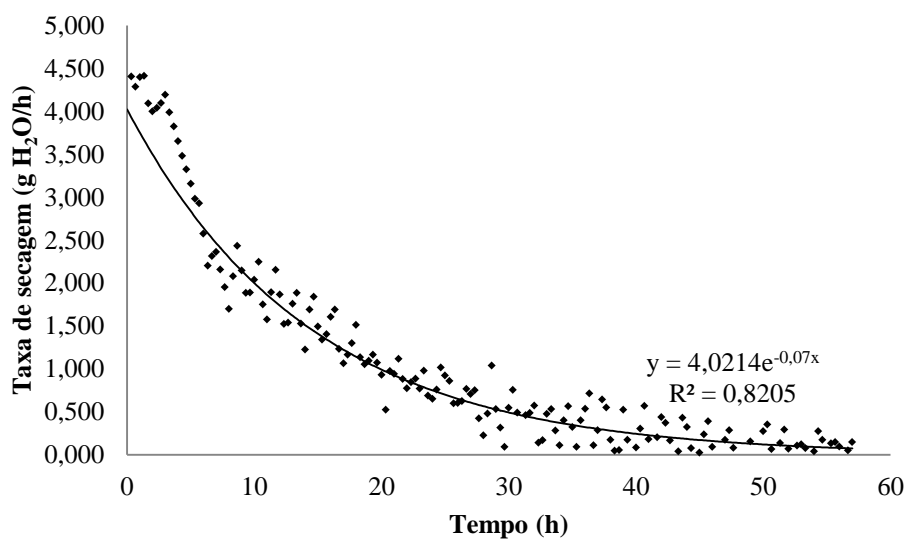


Figura 77: Taxa de secagem em função do tempo de operação para o ensaio 7.

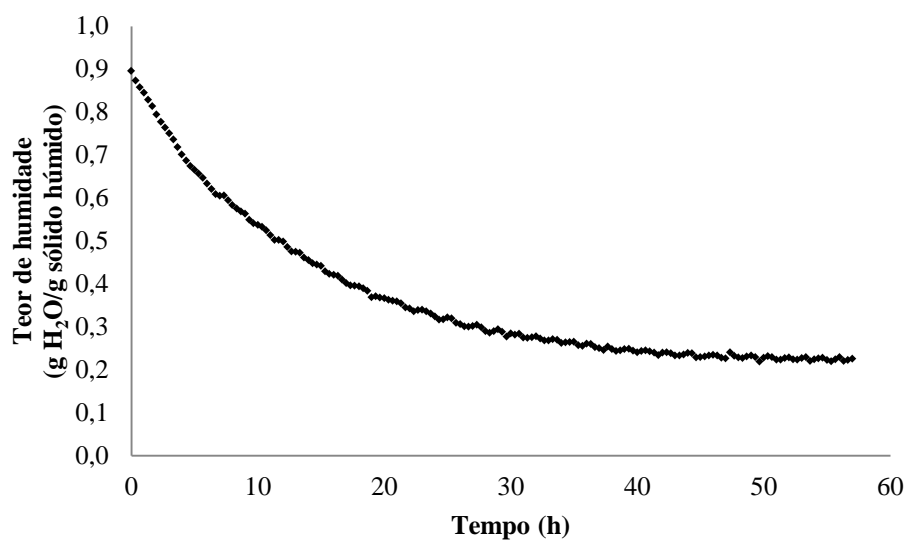


Figura 78: Variação do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 7.

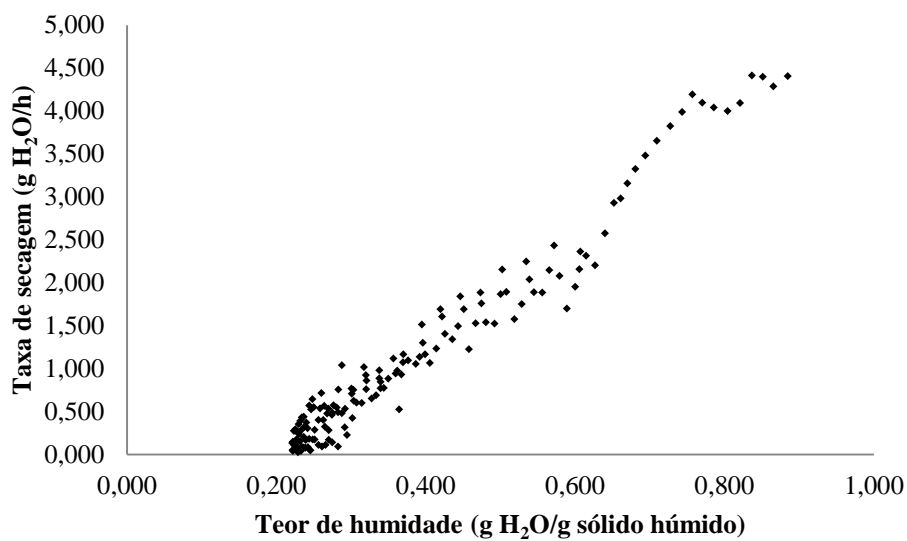


Figura 79: Taxa de secagem em função do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha para o ensaio 7.

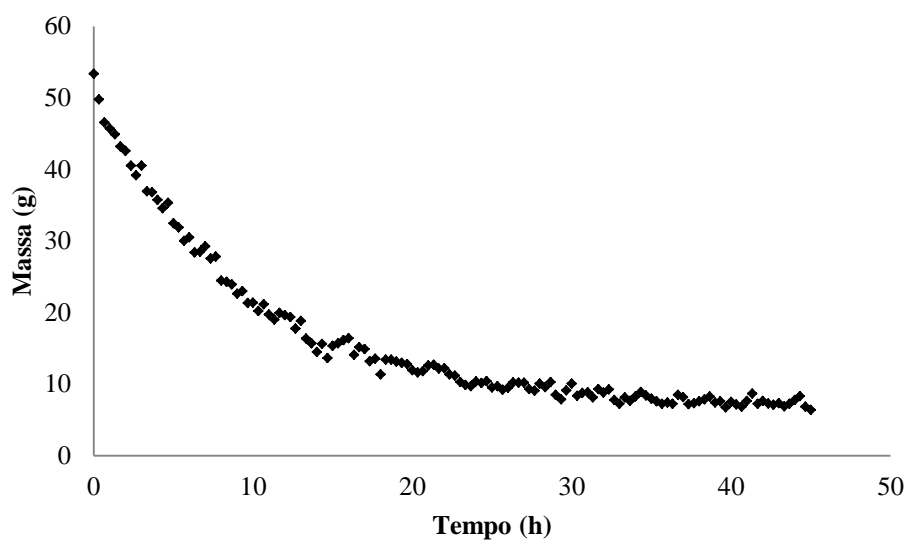


Figura 80: Comportamento da massa da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 8.

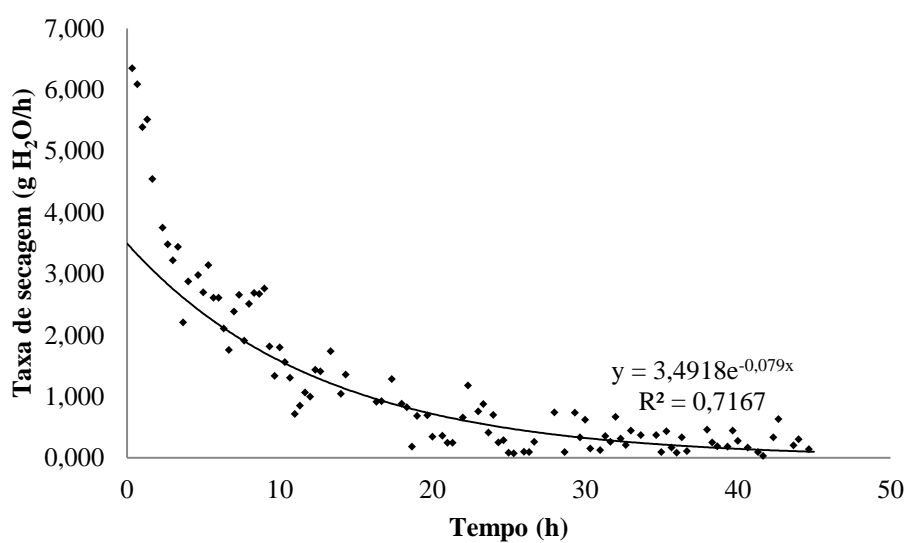


Figura 81: Taxa de secagem em função do tempo de operação para o ensaio 8.

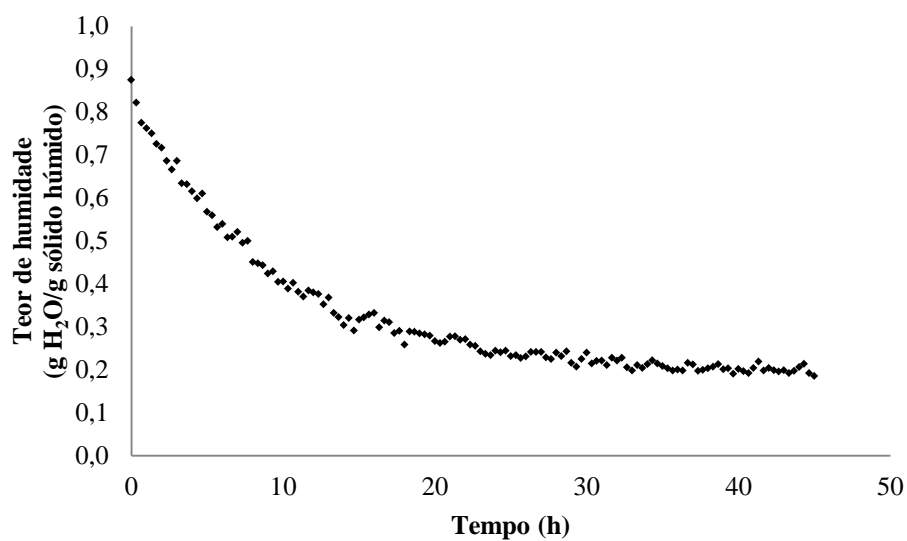


Figura 82: Variação do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 8.

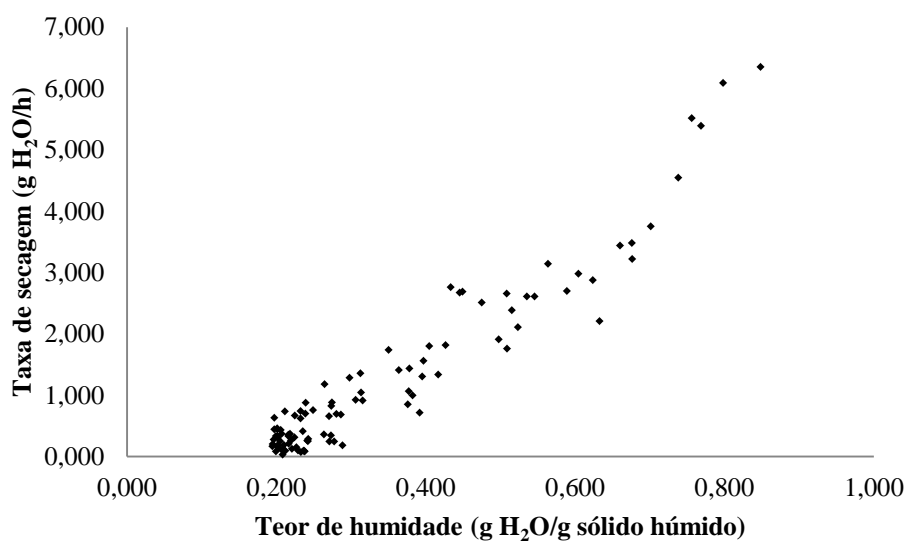


Figura 83: Taxa de secagem em função do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha para o ensaio 8.

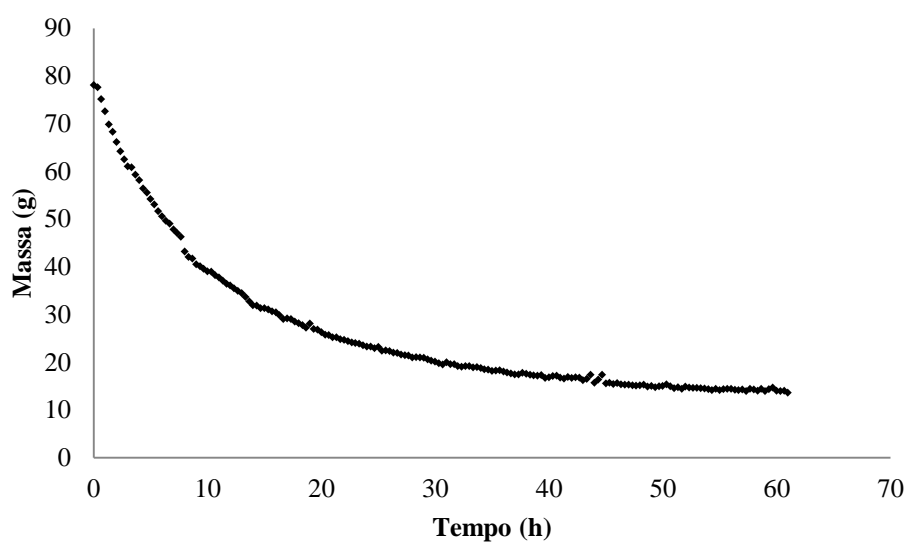


Figura 84: Comportamento da massa da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 9.

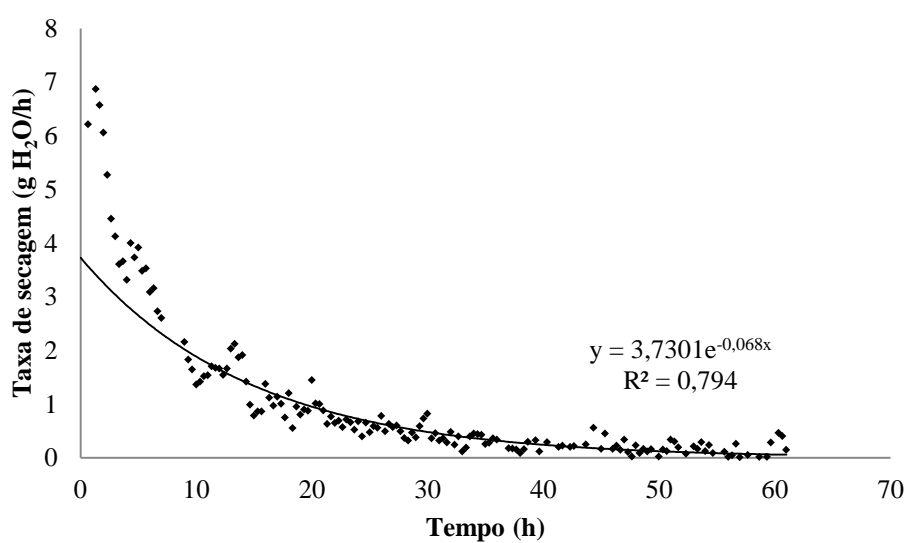


Figura 85: Taxa de secagem em função do tempo de operação para o ensaio 9.

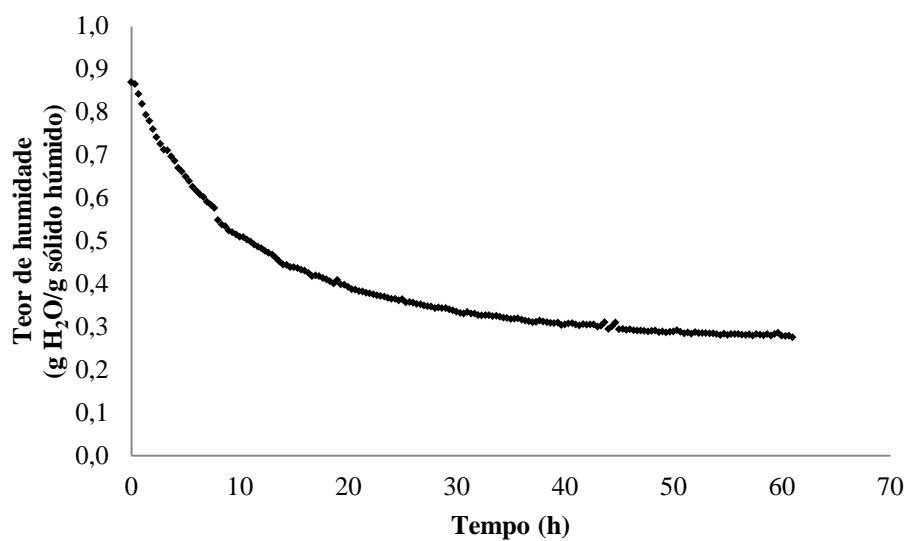


Figura 86: Variação do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio 9.

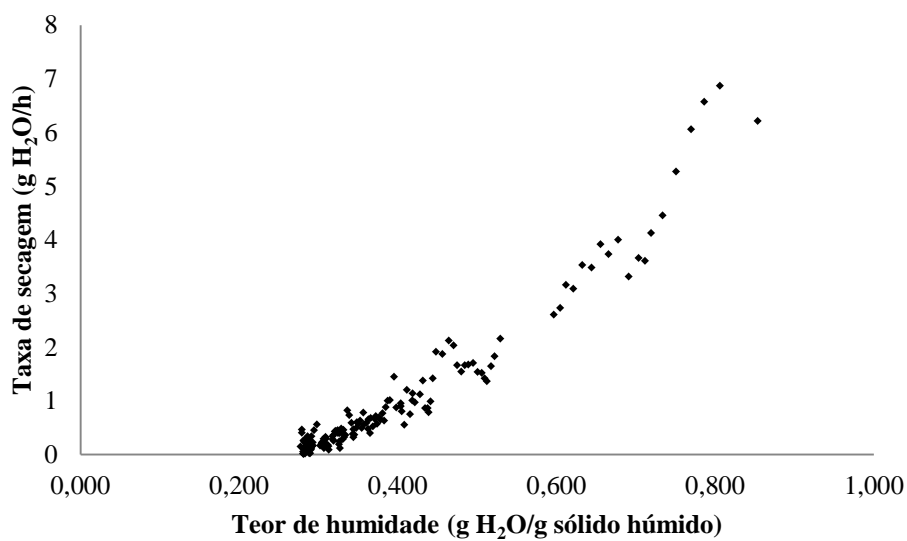


Figura 87: Taxa de secagem em função do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha para o ensaio 9.

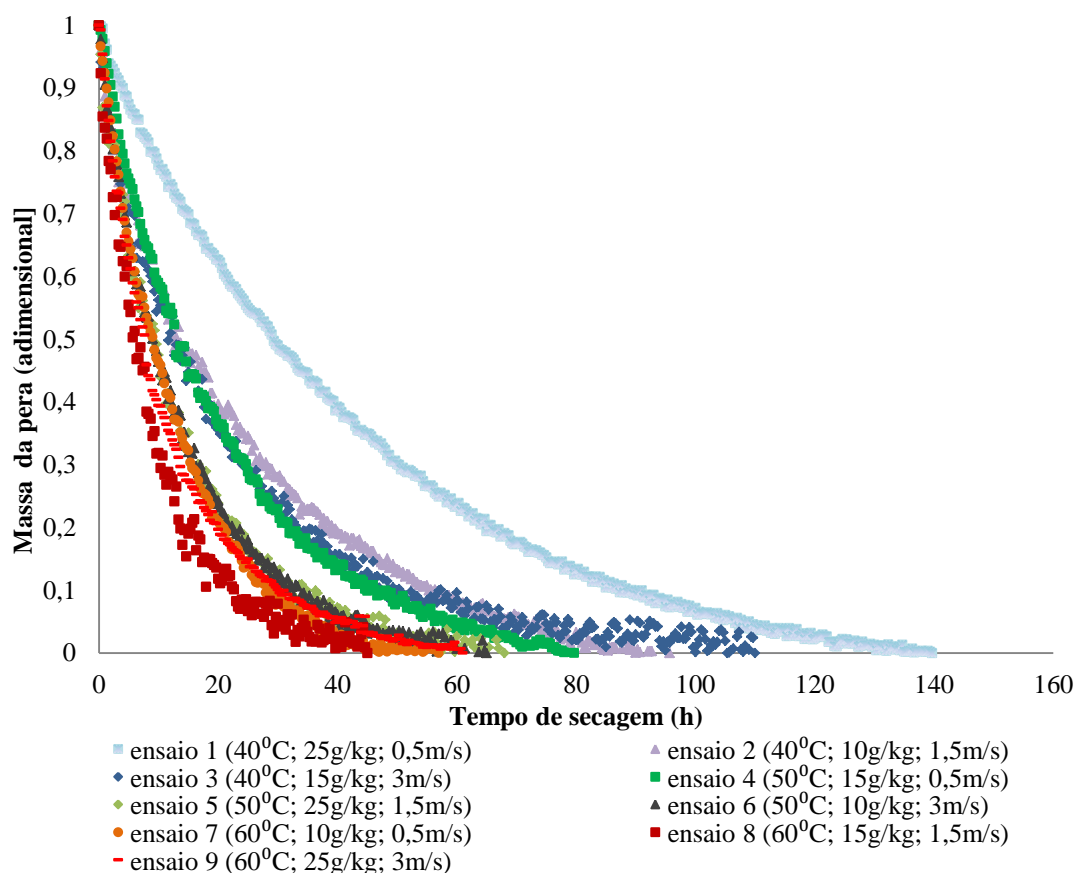


Figura 88: Representação gráfica da massa (adimensional) da pera em função do tempo de secagem para os nove ensaios.

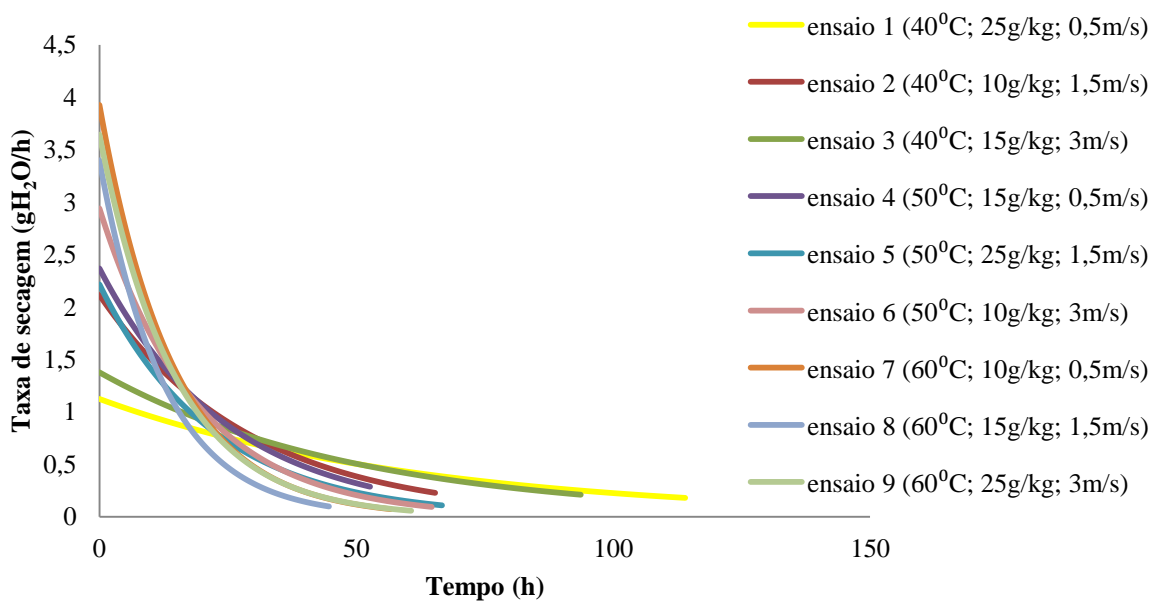


Figura 89: Representação gráfica da taxa de secagem em função do tempo de secagem para os nove ensaios realizados.

Anexo A3: Método Taguchi

Nomenclatura usada para o cálculo da percentagem de influência de cada fator de controlo no tempo de secagem e na dureza das peras secas:

- CF – Fator de correção
- T – Resultados
- N – Números de experiências
- Y_n - Resultado de cada ensaio
- S_t – Soma dos quadrados de todos os fatores
- S_A – Soma dos quadrados de um determinado fator
- P_A – Percentagem de contribuição de cada fator

O fator de correcção foi calculado assim:

$$CF = \frac{T^2}{N} \leftrightarrow CF = \frac{(Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n)^2}{N} \quad \text{Eq. 5}$$

Soma dos quadrados para a totalidade dos fatores:

$$S_t = (Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n)^2 - CF \quad \text{Eq. 6}$$

Soma dos quadrados de um determinado fator:

$$S_A = \frac{A_1^2}{N_{A_1}} + \frac{A_2^2}{N_{A_2}} + \frac{A_3^2}{N_{A_3}} - CF \quad \text{Eq. 7}$$

A percentagem de contribuição de cada fator é calculada do seguinte modo:

$$P_A = S_A \times \frac{100}{S_t} \quad \text{Eq. 8}$$

Anexo A4: Fichas de análise sensorial

- Ficha 1**

Prova de cotação das amostras

Nome: _____ Data: _____

Tipo de Amostra: _____

Característica em estudo: _____

Instruções

Comece por observar atentamente as amostras.

Prova cada amostra da esquerda para a direita e pontue numa escala 1 a 9 a intensidade da cor (escurecimento) para cada amostra.

Caso não as consiga detetar diferenças nas amostras, deverá indicar quais as amostras que consideraram idênticas atribuindo a mesma pontuação na folha de prova.

Amostras	Escala de Pontuação (1-9)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
231									
675									
848									
719									
506									
967									
150									
382									
423									

Comentários:

Obrigado.

- **Ficha 2**

Prova de cotação das amostras

Nome:_____ Data:_____

Tipo de Amostra:_____

Característica em estudo:_____

Instruções

Comece por observar atentamente as amostras.

Prova cada amostra da esquerda para a direita e pontue numa escala 0 a 9 a mastigabilidade (energia requerida para mastigar um alimento sólido até que esteja pronto para engolir). Note que a mastigabilidade é resultado de atributos de textura como a dureza, coesividade e elasticidade do alimento. Caso não as consiga detetar diferenças nas amostras, deverá indicar quais as amostras que consideraram idênticas atribuindo a mesma pontuação na folha de respostas.

Amostras	Escala de Pontuação (1-9)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
azc									
qbd									
efg									
hji									
mny									
ops									
rtu									
zkl									
çxw									

Comentários:

Obrigado.

• **Ficha 3**

Prova de cotação das amostras

Nome: _____ Data: _____

Tipo de Amostra: _____

Característica em estudo: _____

Instruções

Comece por observar atentamente as amostras.

Prova cada amostra da esquerda para a direita e pontue numa escala 0 a 9 a intensidade de sabor para cada amostra.

Caso não as consiga detetar diferenças nas amostras, deverá indicar quais as amostras que consideraram idênticas atribuindo a mesma pontuação na folha de respostas.

Amostras	Escala de Pontuação (1-9)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
wer									
uty									
opi									
sad									
hfg									
khj									
czx									
vnb									
mlk									

Comentários:

Obrigado.

Anexo B: Efeito da temperatura de secagem no processo e no produto

Anexo B1: Controlo das condições de secagem e dados da amostra

Tabela 10: Registo do controlo dos parâmetros de secagem para os quatro ensaios realizados, com temperaturas de secagem diferentes.

Ensaio	Condições de secagem			
	Temperatura (°C)	Humidade absoluta (g/kg)	Velocidade (m/s)	Tempo (h)
A	30,79±0,75	13,88±2,03	2,80±0,17	139,40
B	40,47±0,90	13,73±1,04	2,99±0,12	110,00
C	49,78±0,74	14,88±0,58	2,79±0,18	71,67
D	59,20±0,61	16,04±0,69	2,78±0,18	46,33

Tabela 11: Registo dos valores de massa inicial e final e de humidade inicial e final da Pera Rocha para os quatro realizados, com temperaturas de secagem diferentes.

Ensaio	Dados da amostra			
	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Teor de humidade inicial	Teor de humidade final
A	66,677	9,750	0,893	0,383
B	66,182	10,025	0,886	0,279
C	69,107	12,680	0,884	0,224
D	59,546	10,677	0,885	0,279

Anexo B2: Curva de secagem para os quatro ensaios realizados

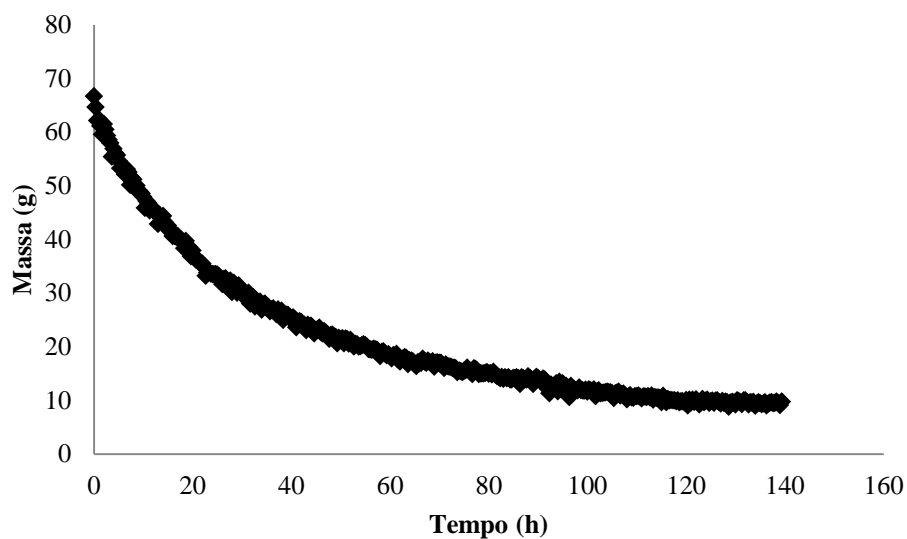


Figura 90: Comportamento da massa da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio A.

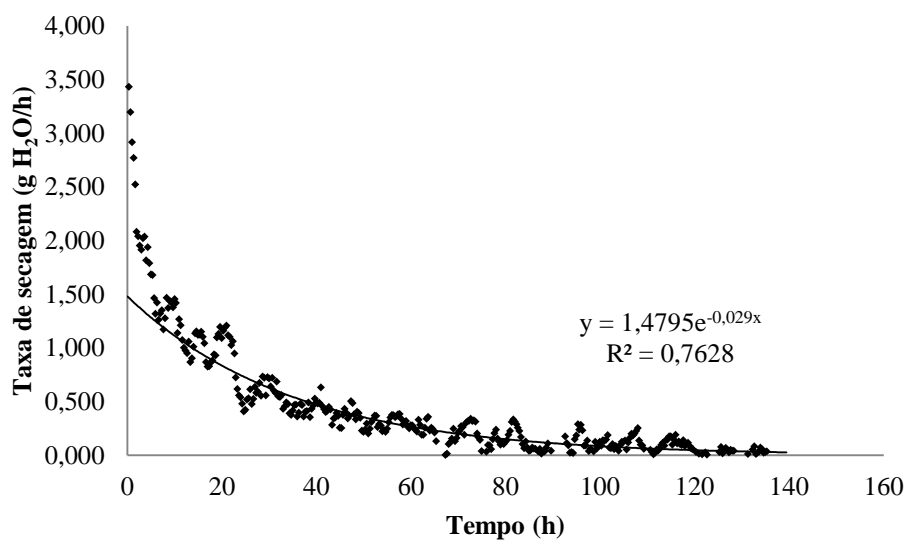


Figura 91: Taxa de secagem em função do tempo de operação para o ensaio A.

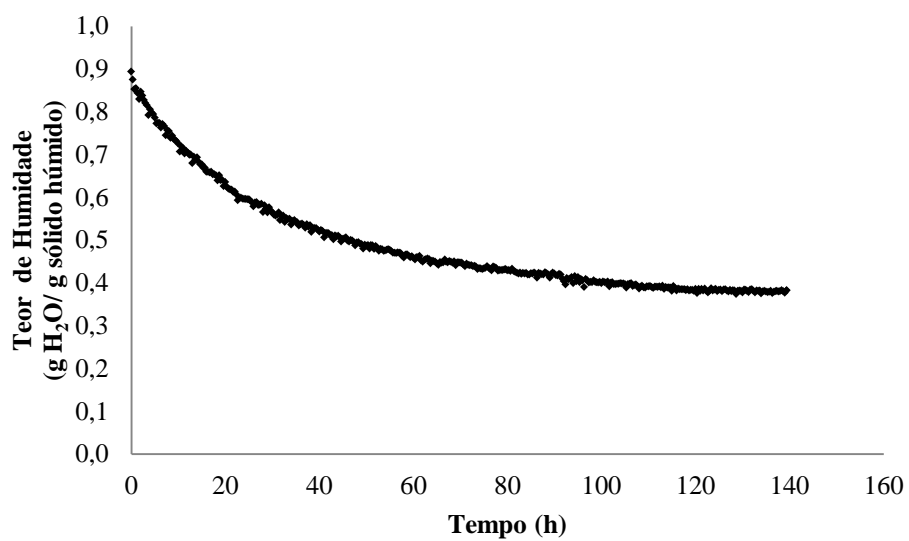


Figura 92: Variação do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio A.

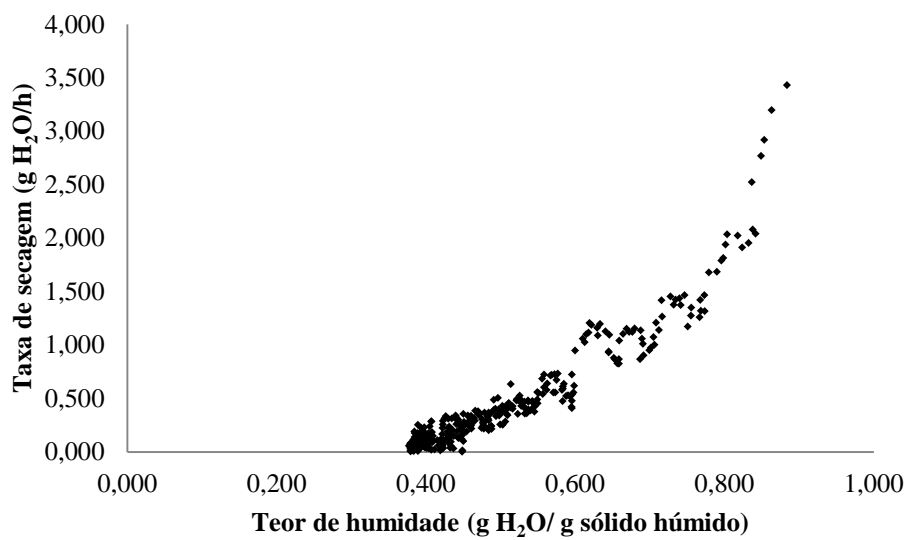


Figura 93: Taxa de secagem em função do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha para o ensaio A.

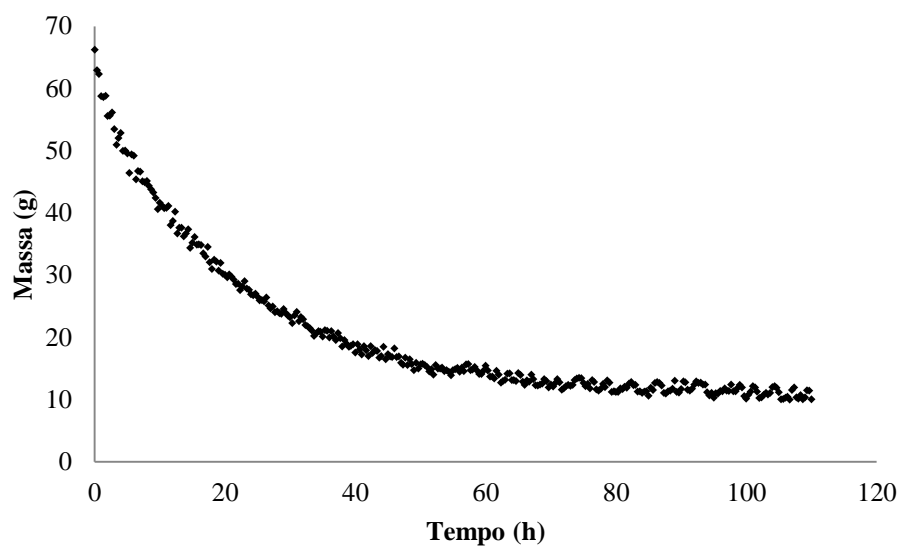


Figura 94: Comportamento da massa da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio B.

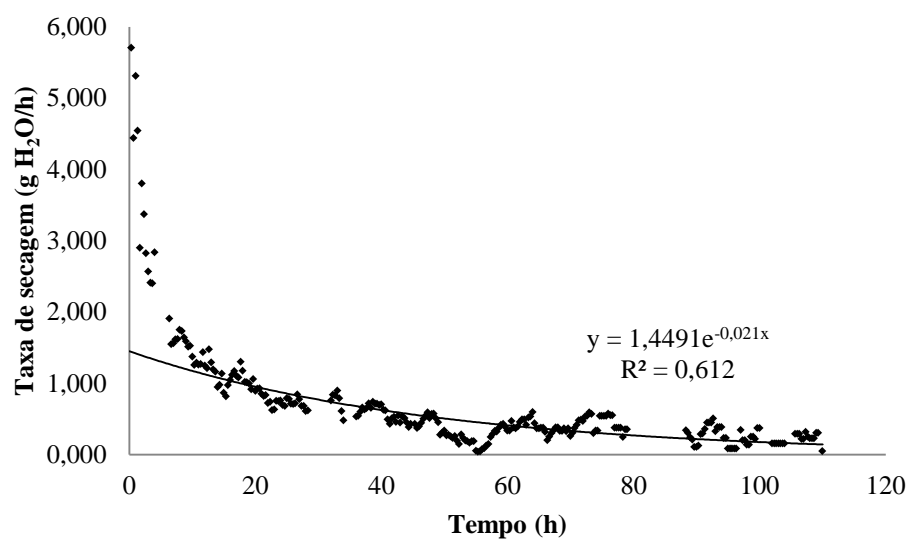


Figura 95: Taxa de secagem em função do tempo de operação para o ensaio B.

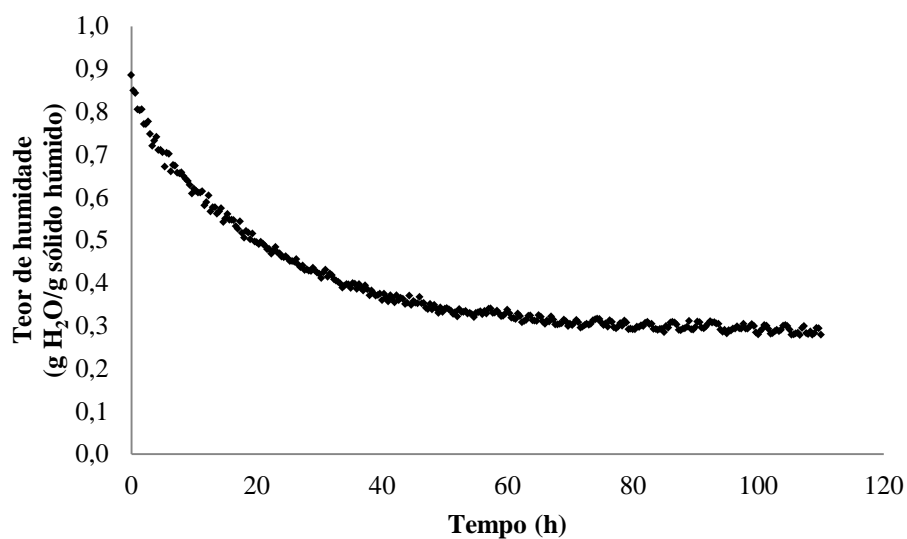


Figura 96: Variação do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio B.

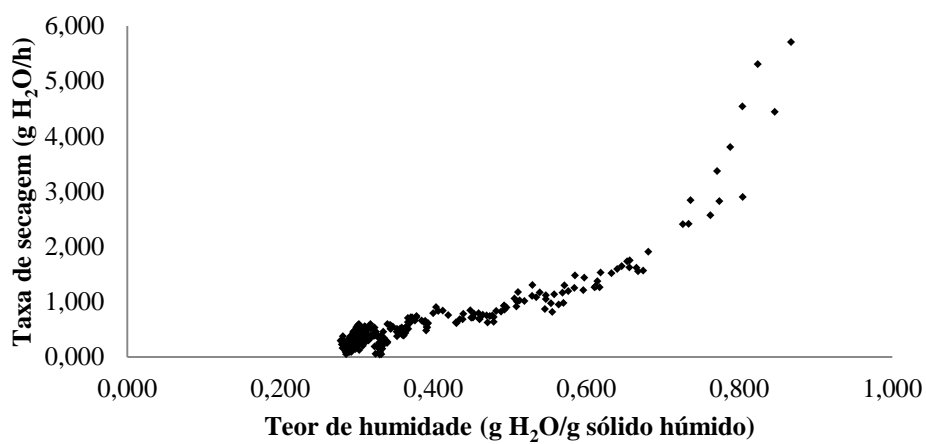


Figura 97: Taxa de secagem em função do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha para o ensaio B.

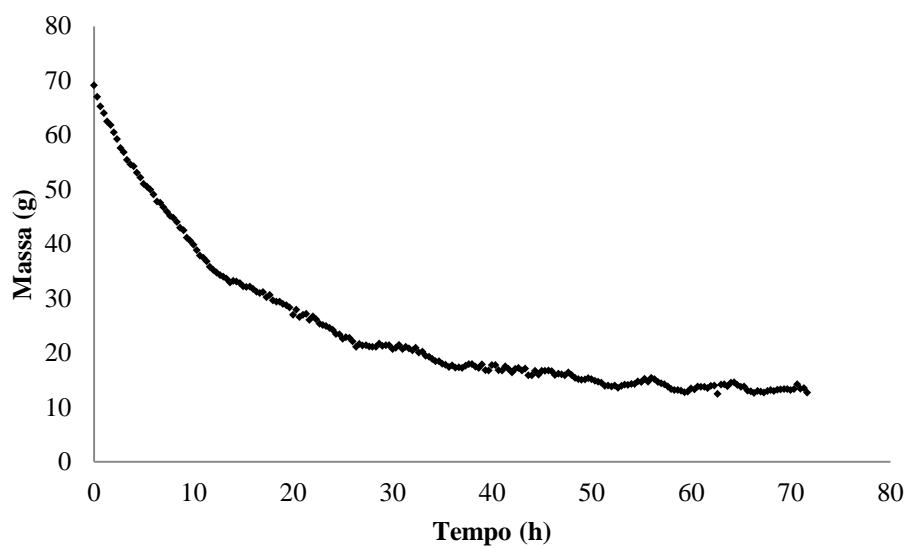


Figura 98: Comportamento da massa da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio C.

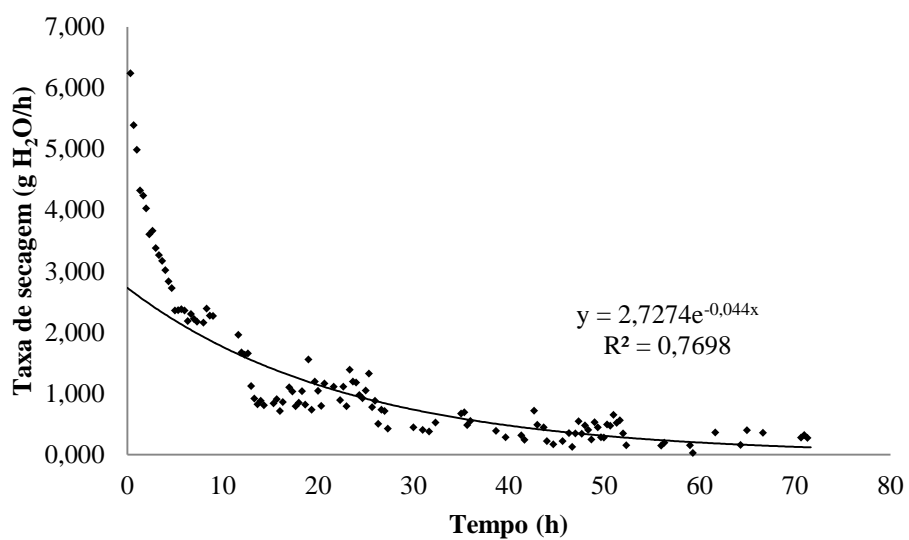


Figura 99: Taxa de secagem em função do tempo de operação para o ensaio C.

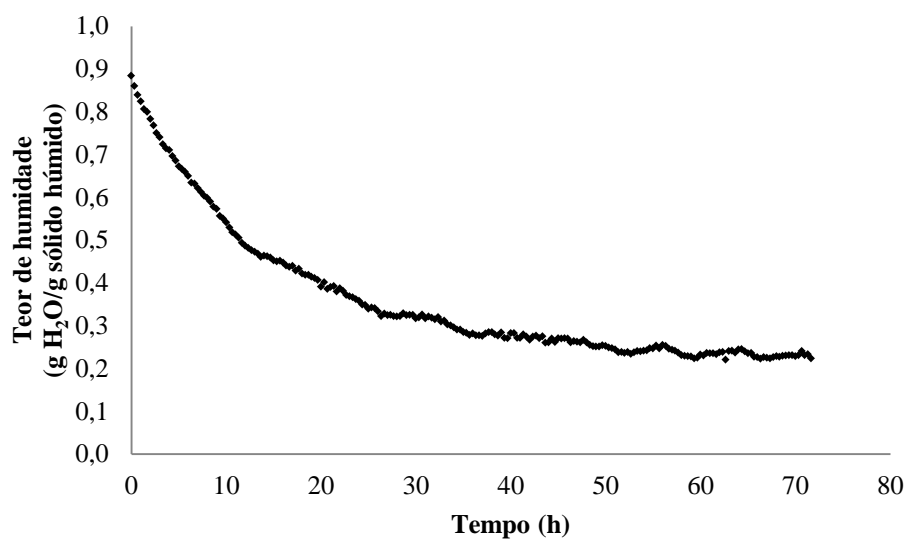


Figura 100: Variação do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio C.

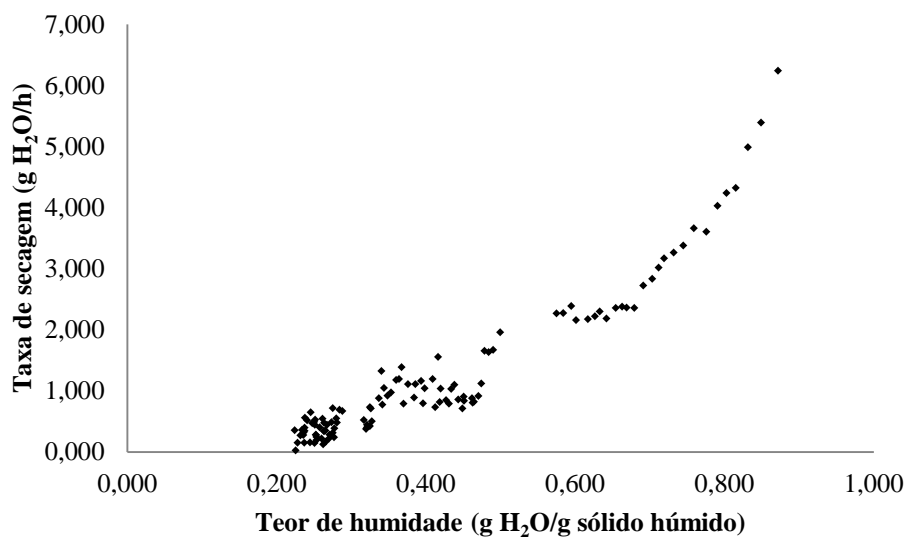


Figura 101: Taxa de secagem em função do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha para o ensaio C.

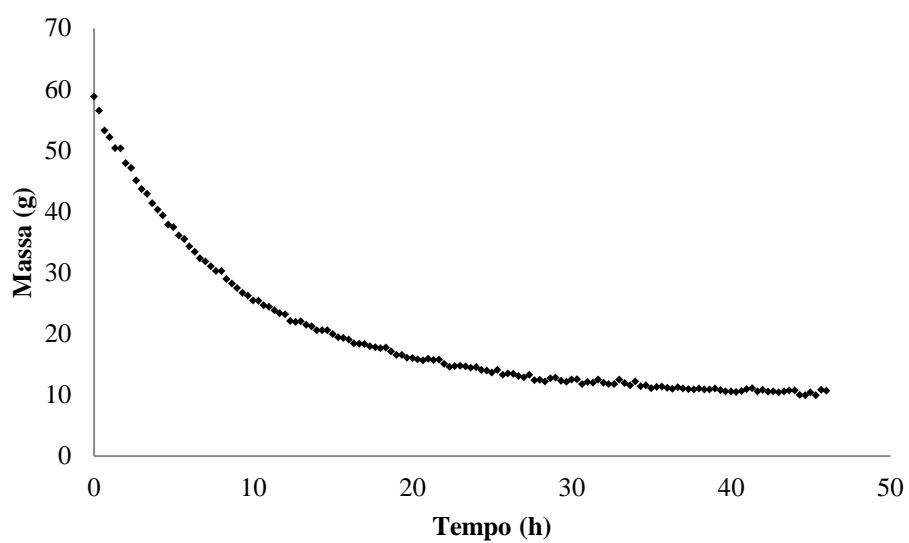


Figura 102: Comportamento da massa da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio D.

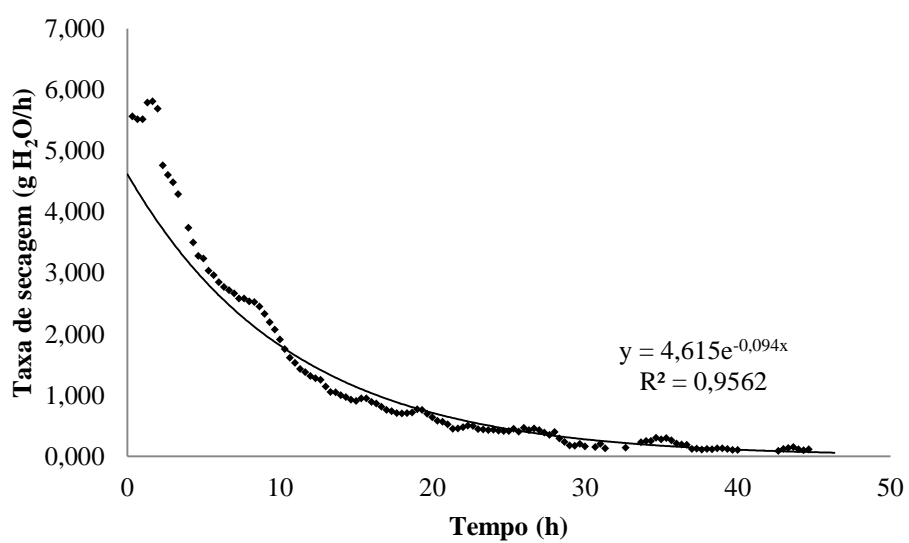


Figura 103: Taxa de secagem em função do tempo de operação para o ensaio D.

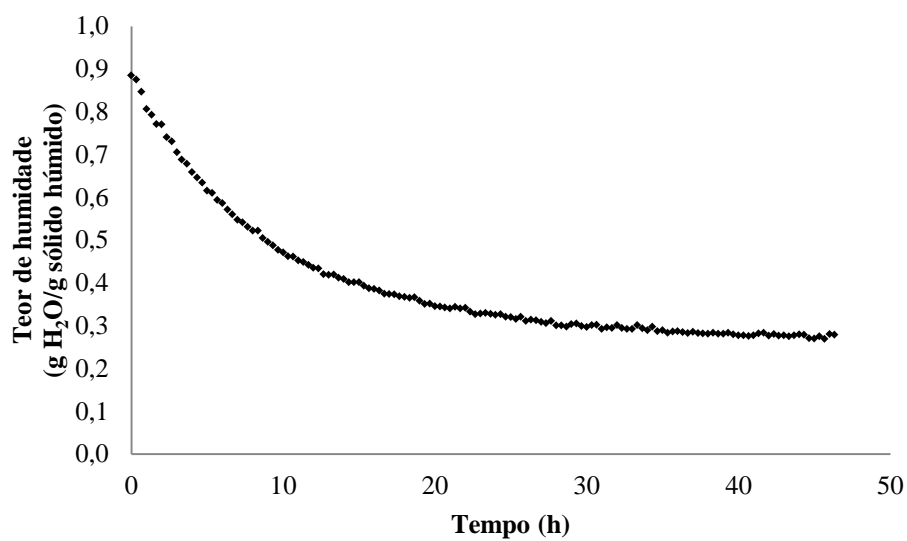


Figura 104: Variação do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha em função do tempo de secagem para o ensaio D.

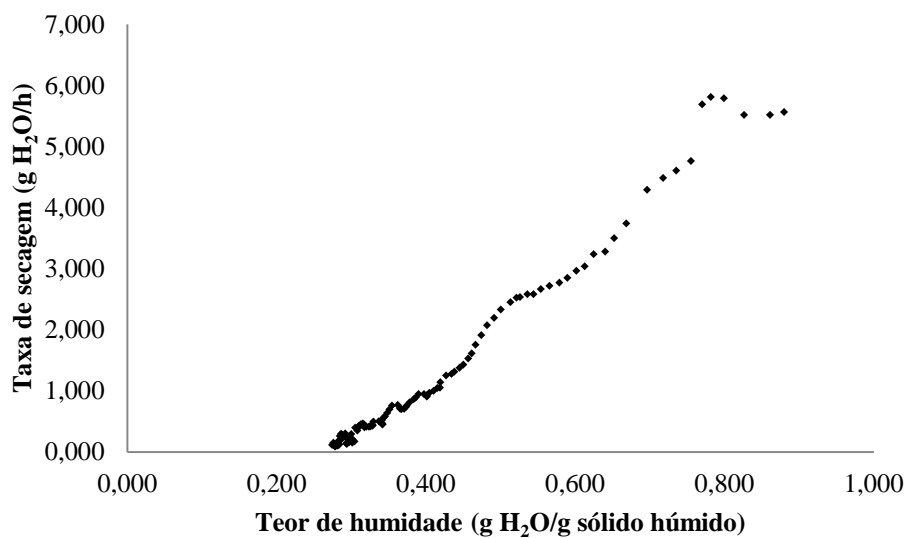


Figura 105: Taxa de secagem em função do teor de humidade (base húmida) da Pera Rocha para o ensaio D.

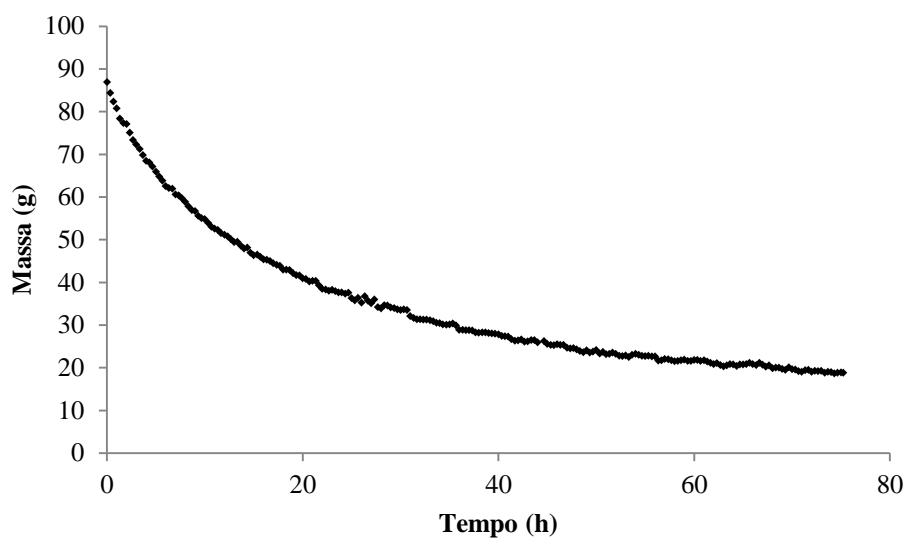


Figura 106: Comportamento da massa da Maçã Malápio da Serra em função do tempo de secagem para o ensaio a 50°C; 15g/kg; 3m/s.

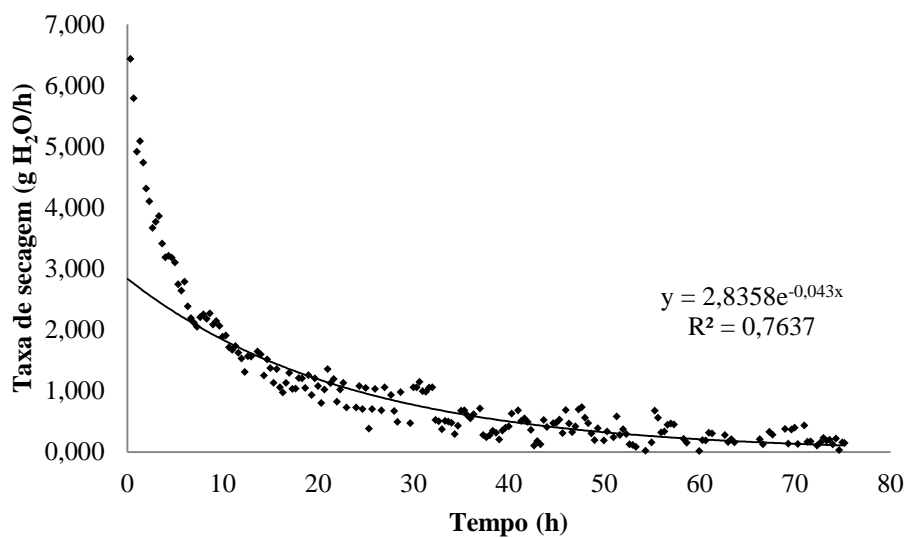


Figura 107: Taxa de secagem em função do tempo de operação para o ensaio a 50°C; 15g/kg; 3m/s.

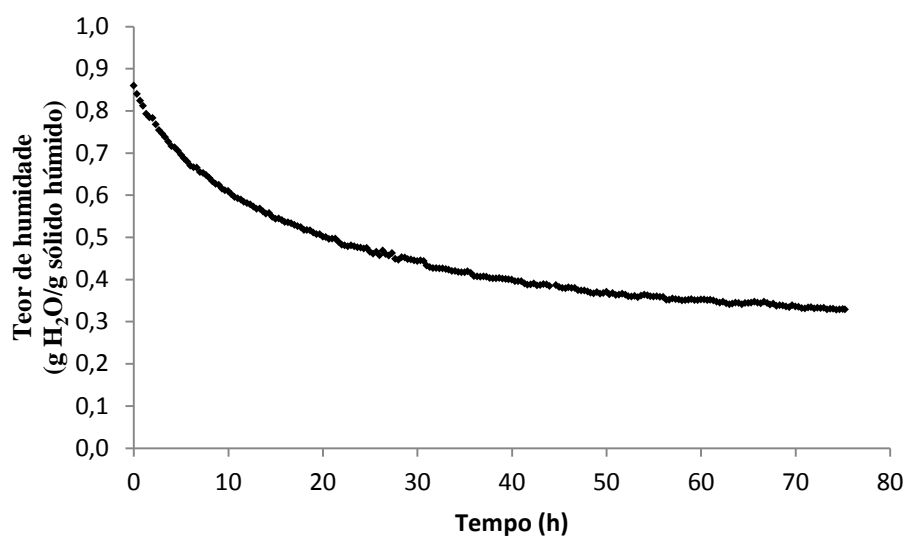


Figura 108: Variação do teor de humidade (base húmida) da Maçã Malápiao da Serra em função do tempo de secagem para o ensaio a 50°C; 15g/kg; 3m/s.

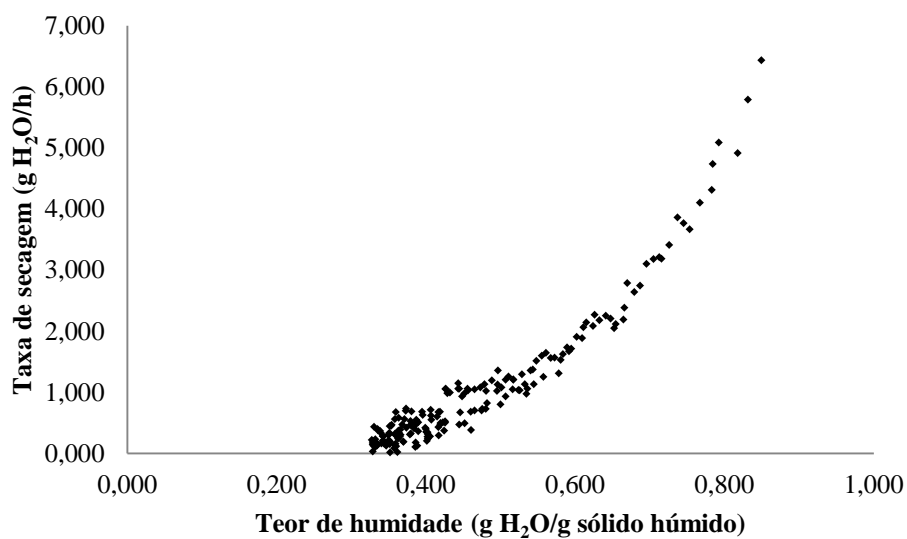


Figura 109: Taxa de secagem em função do teor de humidade (base húmida) da Maçã Malápiao da Serra para o ensaio a 50°C; 15g/kg; 3m/s.

Anexo B3: Determinação da atividade da PPO

Tabela 12: Registo dos valores de atividade da PPO na Maçã Malápio da Serra e Pera Rocha frescas e durante a secagem da pera para diferentes temperaturas de operação.

		Atividade da polifenoloxidase (ΔAbs/min/g peso seco)			
Ensaio		Fresca	3h	6h	18h
Pera Rocha	30°C	20,85±0,83	10,15±0,29	8,18±0,18	5,81±0,12
	40°C	19,39±0,77	3,04±0,01	3,11±0,03	2,56±0,07
	50°C	18,53±0,14	4,03±0,03	2,68±0,05	1,97±0,06
	60°C	19,01±0,50	3,27±0,03	2,78±0,04	3,80±0,01
Maçã Malápio da Serra	50°C	4,01±0,18	—	—	—

Tabela 13: Registo dos valores da atividade da PPO da pera para os processamentos de 50MPa, 100MPa, 200MPa e 400MPa, durante 5 minutos.

		Atividade da polifenoloxidase (ΔAbs/min/g peso seco)
Pera Rocha	Fresca	20,14±0,39
	50MPa	3,73±0,37
	100MPa	18,16±0,18
	200MPa	4,97±0,19
	400MPa	4,63±0,15